

Versuch der Lokalisierung und Interpretation von Feldheterogenitäten anhand von optischen Satellitenaufnahmen

- Ein Vergleich von Landsat Thematic Mapper und IRS-1C -

vorgelegt von:

Erik Zillmann

am Fachbereich 7 Umwelt und Gesellschaft

Institut für Landschaftsentwicklung

der Technischen Universität Berlin

DIPLOMARBEIT

Eingereicht bei:

Herrn Prof. Dr. H. Kenneweg

Berlin, SS 1999

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Vorwort

1	EINLEITUNG	1
2	ZIELSTELLUNG UND METHODIK	4
2.1	Problemstellung	4
2.1.1	Feldheterogenitäten	6
2.1.2	Mögliche Reaktionen auf vorhandene Feldheterogenitäten	7
2.2	Zielstellung	11
2.3	Methodische Herangehensweise	12
3	DATENGRUNDLAGEN	15
3.1	Satellitenszenen	15
3.1.1	Witterung zum Zeitpunkt der jeweiligen Aufnahmen	16
3.1.2	Stand der Landbearbeitung zum Zeitpunkt der Aufnahmen	19
3.2	Ground Truth Daten	20
3.2.1	Geologische Karten	21
3.2.2	Topografische Karten	21
3.2.3	Reichsbodenschätzung (RBS)	21
3.2.4	Mittelmaßstäbige Standortkartierung für die Landwirtschaft (MMK)	24
3.2.5	Ergebnisse des Felduntersuchungsprogramms	25
4	DER UNTERSUCHUNGSRAUM	28
4.1	Auswahlkriterien und Lage	28
4.2	Geologischer Überblick	29

4.3	Das Relief	30
4.4	Der Boden	31
4.4.1	Die Böden des Untersuchungsgebietes	31
4.4.2	Beschreibung der vorhandenen kleinräumigen Feldheterogenitäten	35
4.4.2.1	Testschlag 203 bei Rohrbach	36
4.4.2.2	Testschlag 205 bei Rohrbach	37
4.4.2.3	Testschlag 211 bei Buttstedt	37
4.4.2.4	Testschlag 304 bei Rohrbach	38
4.4.2.5	Testschlag 414 bei Wohlsborn	38
4.4.2.6	Testschlag 704 bei Daasdorf	39
4.4.2.7	Testschlag 706 bei Daasdorf	40
4.4.2.8	Testschlag 809 bei Buttstedt	41
4.5	Klimatische Verhältnisse	41
4.6	Anthropogene Landnutzung	42
5	GRUNDLAGEN DER FERNERKUNDUNG	43
5.1	Beginn und Entwicklung der Fernerkundung	43
5.2	Physikalische Grundlagen der Fernerkundung	44
5.2.1	Elektromagnetische Strahlung	44
5.2.2	Vorgänge an der Erdoberfläche	46
5.3	Verschiedene Aufnahmesysteme und deren Aufnahmeprinzipien	47
5.3.1	Passive Aufnahmesysteme	48
5.3.1.1	Spektrale Auflösung	50
5.3.1.2	Geometrische Auflösung	51
5.3.1.3	Radiometrische Auflösung	52
5.3.2	Landsat-5-TM und IRS-1C	53
5.4	Die Szene beeinflussende Parameter	56

5.4.1	Atmosphäre	56
5.4.2	Sonneneinfallswinkel	57
5.4.3	Topografie	58
5.4.4	Art der Landbewirtschaftung	59
5.5	Anwendungspotential der Fernerkundung in der Landschaftsplanung	60
6	ALLGEMEINE REFLEXIONSEIGENSCHAFTEN	67
6.1	Reflexions- und Absorptionseigenschaften von Böden	68
6.1.1	Konstante Parameter	72
6.1.1.1	Humusgehalt	72
6.1.1.2	Eisengehalt	75
6.1.1.3	Kalkgehalt	77
6.1.1.4	Bodentextur	78
6.1.1.5	Mineralbestand/Tongehalt	78
6.1.2	Variable Parameter	80
6.1.2.1	Bodenfeuchte	80
6.1.2.2	Oberflächenrauigkeit und Bodenbearbeitung	82
6.2	Reflexions- und Absorptionseigenschaften von Vegetation	83
6.3	Reflexionseigenschaften von Gewässern	86
6.4	Das Problem der Mischsignale	86
6.5	Nutzungspotential für die Fernerkundung von Böden	87
6.6	Lokalisierung von Feldheterogenitäten	91
7	DIGITALE BILDVERARBEITUNG	94
7.1	Statistische Datenaufbereitung	95
7.1.1	Grauwertverteilung	95
7.1.2	Korrelationsanalyse	98
7.2	Geometrische Verbesserungen	99

7.3	Radiometrische Verbesserungen	100
7.3.1	Grauwertmanipulation	100
7.3.2	Atmosphärenkorrektur	103
7.3.3	Korrektur des Reliefeinflusses	104
7.4	Verknüpfung verschiedener Datensätze	105
7.4.1	Ratiobildung	105
7.4.2	Farbkomposite	107
7.5	Digitale Auswertung	111
7.5.1	Unüberwachte Klassifizierung	112
7.5.1.1	K-Means-Klassifikator	113
7.5.1.2	Isodata-Klassifikator	113
7.5.1.3	Fuzzy K-Means-Klassifikator	114
7.5.2	Überwachte Klassifikation	115
7.5.2.1	Das Minimum-Distance-Verfahren	115
7.5.2.2	Das Parallelepiped-Verfahren (Hyperbox)	116
7.5.2.3	Das Maximum-Likelihood-Verfahren	117
8	VISUELLE UND DIGITALE AUSWERTUNG	120
8.1	Informationsvergleich von Karte und Satellitenbild	121
8.1.1	Visuelle Auswertung der Testgebiete	122
8.1.1.1	Analyse der Reflexionswerte von Schlag 203	123
8.1.1.2	Analyse der Reflexionswerte von Schlag 205	126
8.1.1.3	Analyse der Reflexionswerte von Schlag 304	128
8.1.1.4	Analyse der Reflexionswerte von Schlag 414	132
8.1.1.5	Analyse der Reflexionswerte von Schlag 704	134
8.1.1.6	Analyse der Reflexionswerte von Schlag 706	135
8.1.1.7	Analyse der Reflexionswerte von Schlag 809	137

8.1.2	Automatische Klassifikation der Testgebiete	138
8.1.3	Automatische Klassifikation des gesamten Untersuchungsraums	142
8.1.3.1	Ermittlung der Trainingsgebiete	143
8.1.3.2	Überwachte Klassifikation des Untersuchungsgebietes	147
8.1.3.3	Verifizierung der Klassifikation	149
8.2	Analyse der Korrelation von Bodeneinhaltsstoffen und Reflexionswerten	154
8.2.1	Beschreibung der Grauwertverteilung	156
8.2.2	Beschreibung der Bodenuntersuchungsergebnisse	157
8.2.3	Interpretation der Korrelationen	159
8.3	Zusammenfassende Diskussion der Analyseergebnisse	163
9	FAZIT UND BLICK IN DIE ZUKUNFT	169
10	DANKSAGUNG	172
	LITERATURLISTE	173

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Aufnahmedaten der verwendeten Szenen	15
Tab. 2: Niederschlagswerte vor dem 25.09.1997	18
Tab. 3: Niederschlagswerte vor dem 01.09.1997	19
Tab. 4: Im Untersuchungsraum vorkommende Standortregionaltypen	34
Tab. 5: Technische Daten der Satellitengestützten Aufnahmesysteme	54
Tab. 6: Grauwertverteilung der verwendeten Kanäle des Landsat-TM Subimage	96
Tab. 7: Korrelationskoeffizienten der betrachteten 6 Landsat-TM Kanäle	99
Tab. 8: Werte des OIF und die Rangfolge für die TM-Kanaltriplets	110

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Variabilität der Bodendichten auf einem Schlag	5
Abb. 2: Das elektromagnetische Spektrum	45
Abb. 3: Referenzsystem für Landsat 4	55
Abb. 4: Reflexionskurven verschiedener Oberflächenmaterialien	68
Abb. 5: Charakteristische Bodenreflexionskurven	69
Abb. 6: Einteilung der reflexionswirksamen Bodenparameter	72
Abb. 7: Abhängigkeit der Bodenreflexion vom Gehalt organischer Substanz	73
Abb. 8: Abhängigkeit der Bodenreflexion vom Eisenoxidgehalt im Spektralbereich von 0.5-0.64µm	76
Abb. 9: Spektrale Reflexionskurven von Sandböden mit unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt	81
Abb. 10: Grauerthistogramme der Landsat-TM Daten in unlinearisierter Form	97
Abb. 11: Beispiele für mögliche Kontrastveränderungen	102
Abb. 12: Relative Reaktion der Photopigmente des menschlichen Auges	108
Abb. 13: Minimum-Distance-Verfahren	116
Abb. 14: Parallelepiped-Klassifikator	117

Abb. 15: Maximum-Likelihood Verfahren	118
Abb. 16: Bodensignaturdiagramm von Schlag 203	125
Abb. 17: Bodensignaturdiagramm von Schlag 205	127
Abb. 18: Bodensignaturdiagramm von Schlag 304	130
Abb. 19: Bodensignaturdiagramm von Schlag 414	133
Abb. 20: Bodensignaturdiagramm von Schlag 704	135
Abb. 21: Bodensignaturdiagramm von Schlag 706	136
Abb. 22: Bodensignaturdiagramm von Schlag 809	138
Abb. 23: Bodensignaturdiagramm von Schlag 211 aus Landsat-TM Daten	155
Abb. 24: Bodensignaturdiagramm von Schlag 211 aus IRS-1C Daten	157
Abb. 25: Einzelkanaldarstellung von Schlag 211 in IRS-1C Kanal 2	161

Abbildungen im Anhang

Anhang A

Abb. A-1:	Untersuchungsraum bei Butteltstedt als Landsat TM3 Szene mit markierten Testschlägen
Abb. A-2:	Vegetationsindex aus TM-3 und TM-4 von dem Untersuchungsraum
Abb. A-3:	Vegetationsindexmaske über dem Untersuchungsraum in RGB TM-345 Darstellung – überlagert mit MMK -
Abb. A-4:	Standortregionaltypen der MMK

Anhang B - Abbildungen von Schlag 203 -

Abb. B-1:	TM-3 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97
Abb. B-2:	TM-4 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97
Abb. B-3:	TM-5 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97
Abb. B-4:	TM-7 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97
Abb. B-5:	IRS-1C LISS 1 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 25.09.97
Abb. B-6:	IRS-1C LISS 2 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 25.09.97
Abb. B-7:	IRS-1C LISS 3 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 25.09.97

Abb. B-8: RGB - TM-543 - mit RBS überlagert

Abb. B-9: RGB – LISS 231 – mit RBS überlagert

Abb. B-10: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen TM-347 – Einteilung in 4 Klassen

Abb. B-11: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen LISS 123 – Einteilung in 4 Klassen

Anhang C - Abbildungen von Schlag 205 -

Abb. C-1: TM-3 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. C-2: TM-4 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. C-3: TM-5 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. C-4: TM-7 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97-

Abb. C-5: RGB - TM-543 - mit RBS überlagert

Abb. C-6: RGB – LISS 231 – mit RBS überlagert

Abb. C-7: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen TM-347 – Einteilung in 4 Klassen

Anhang D - Abbildungen von Schlag 304 -

Abb. D-1: TM-3 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. D-2: TM-4 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. D-3: TM-5 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. D-4: TM-7 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. D-5: RGB - TM-754 - mit RBS überlagert

Abb. D-6: RGB – LISS 231 – mit RBS überlagert

Abb. D-7: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen TM-347 – Einteilung in 4 Klassen

Abb. D-8: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen TM-347 – Einteilung in 14 Klassen

Anhang E - Abbildungen von Schlag 414

Abb. E-1: TM-3 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. E-2: TM-4 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. E-3: TM-5 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. E-4: TM-7 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. E-5: IRS-1C LISS 1 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 25.09.97

Abb. E-6: IRS-1C LISS 2 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 25.09.97

Abb. E-7: IRS-1C LISS 3 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 25.09.97

Abb. E-8: RGB - TM-574 - mit RBS überlagert

Abb. E-9: RGB – LISS 231 – mit RBS überlagert

Abb. E-10: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen TM-234 – Einteilung in 4 Klassen

Abb. E-11: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen TM-345 – Einteilung in 4 Klassen

Abb. E-12: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen LISS 123 – Einteilung in 4 Klassen

Anhang F - Abbildungen von Schlag 704 -

Abb. F-1: TM-3 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. F-2: TM-4 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. F-3: TM-5 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. F-4: TM-7 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. F-5: RGB - TM-574 - mit RBS überlagert

Abb. F-6: RGB – LISS 231 – mit RBS überlagert

Abb. F-7: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen TM-347 – Einteilung in 4 Klassen

Abb. F-8: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen LISS 123 – Einteilung in 4 Klassen

Anhang G - Abbildungen von Schlag 706

Abb. G-1: TM-3 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. G-2: TM-4 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. G-3: TM-5 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. G-4: TM-7 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. G-5: RGB - TM-574 - mit RBS überlagert

Abb. G-6: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen TM-347 – Einteilung in 4 Klassen

Anhang H - Abbildungen von Schlag 809 -

Abb. H-1: TM-3 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97-

Abb. H-2: TM-4 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97-

Abb. H-3: TM-5 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97-

Abb. H-4: TM-7 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97-

Abb. H-5: RGB - TM-543 - mit RBS überlagert

Abb. H-6: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen TM-345 – Einteilung in 4 Klassen

Abb. H-7: Fuzzy-Klassifikation mit Input-Kanälen LISS 123 – Einteilung in 4 Klassen

Anhang I – überwachte Klassifikationen -

Abb. I-1: Fuzzy-K-Means-Klassifikation von Schlag 203: Einteilung in 3 Klassen zur Verwendung als Trainingsgebiete

Abb. I-2: Fuzzy-K-Means-Klassifikation von Schlag 809: Einteilung in 4 Klassen zur Verwendung als Trainingsgebiete

Abb. I-3: Maximum-Likelihood-Klassifikation (ML) (TM 347) des gesamten Untersuchungsraums – überlagert mit MMK – Schläge 203 und 809 als 2 Trainingsklassen

Abb. I-4: Maximum-Likelihood-Klassifikation (TM 347) des gesamten Untersuchungsraums – überlagert mit MMK – Schläge 203 und 809 als 6 Trainingsklassen

Abb. I-5: Parallelepiped-Klassifikation mit Maximum-Likelihood als „tie breaker“ und den Schlägen 203 und 809 als 6 Trainingsklassen

Abb. I-6: ML-Klassifikation von Schlag 205 mit den Inputkanälen TM-347

Abb. I-7: ML-Klassifikation von Schlag 304 mit den Inputkanälen TM-347

Abb. I-8: ML-Klassifikation von Schlag 414 mit den Inputkanälen TM-347

Abb. I-9: ML-Klassifikation von Schlag 704 mit den Inputkanälen TM-347

Abb. I-10: ML-Klassifikation von Schlag 706 mit den Inputkanälen TM-347

Anhang J – Abbildungen von Schlag 211-

Abb. J-1a-c: Landsat-TM Kanäle 3-5 linearisiert – Aufnahmedatum 22.09.97

Abb. J-2a-c: IRS-1C LISS 1-3 linearisiert –Aufnahmedatum 01.09.97

Abb. J-3: TM-3 mit RBS überlagert

Abb. J-4: RGB-LISS 231 mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 25.09.97

Abb. J-5: RGB-LISS 231 – Aufnahmedatum 01.09.97

Abb. J-6: Ratio aus LISS 3 und 4 – Aufnahmedatum 01.09.97

Abb. J-7a-b: Ratio aus TM 3/4 und TM 4/5 –Aufnahmedatum 22.09.97

Anhang K – Ergebnisse der Bodenuntersuchung

Abb. K-1a: Calciumcarbonatgehalt

Abb. K-1b: organischer Kohlenstoffgehalt (Humusgehalt)

Abb. K-1c: Gesamtstickstoffgehalt

Abb. K-1d: Kaliumgehalt

Abb. K-1e: Magnesiumgehalt

Abb. K-1f: Phosphorgehalt

Abb. K-2a: Tongehalt

Abb. K-2b: Schluffgehalt

Abb. K-2c: Sandgehalt

Abb. K-2d: Luftkapazität

Abb. K-2e: Nutzbare Feldkapazität

Abb. K-2f: Gesamtporenvolumen

Abb. K-2g: Lagerungsdichte

Vorwort

Im Rahmen meines Studiums, der Landschaftsplanung am Fachbereich Umwelt und Gesellschaft an der Technischen Universität Berlin, ist es leider nur in begrenztem Maße möglich, sich mit dem Thema der Fernerkundung auseinander zusetzen. Ich hatte das Glück an einer kombinierten Veranstaltung am Institut für Landschaftsentwicklung unter der Leitung von Herrn Professor Kenneweg teilnehmen zu können, in der die Grundlagen der Thematik der Luftbilddauswertung, Fernerkundung und Anwendung von Geografischen Informationssystemen vermittelt wurden. Auf diesem Wege konnte ich einige Grundlagenkenntnisse und Anregungen erfahren, die mein Interesse an der Fernerkundung geweckt haben.

Da das Tätigkeitsfeld eines Landschaftsplaners nicht nur auf kleinräumige, lokale Gebiete beschränkt ist, sondern immer mehr regionale und überregionale Größenordnungen erreicht, ist die Verwendung der Fernerkundungstechnik ein Hilfsmittel, auf das er z. B. im Rahmen der Datenerhebung, aber auch im Monitoringbereich, nicht verzichten kann. Aufgrund der immensen Kosten- und Zeitersparnis, sowie dem möglichen Informationsgewinn, wird der Fernerkundung in Zukunft, durch die sich immer verbessernde Technik, eine zunehmend größere Bedeutung zukommen.

Mit dem erweckten Interesse und dem Blick in die Zukunft faßte ich den Entschluß, mich mit diesem Bereich intensiver auseinander zusetzen, und eine Diplomarbeit auf diesem Gebiet zu schreiben, wodurch ich meine Kenntnisse zunehmend vertiefen konnte. Dies wurde mir im Rahmen eines Projektes der Jenaoptronik GmbH ermöglicht.

Seit 1993 arbeiten die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) und die Jenaoptronik GmbH an dem Projekt HOLT - „Nutzung **H**ochauflösender Satellitendaten für die Aufgaben der **L**andwirtschaftsverwaltung **T**hüringens“. Dieses Projekt basiert auf der Feststellung, daß „Flächendaten über Boden- und Standortmerkmale, Form und Größe der Felder und Landschaftselemente mit herkömmlichen, traditionellen Erkundungs- und Kartierungsmethoden nicht mehr rationell und mit ausreichender Genauigkeit zu beschaffen sind“ (TLL JENA und JENAOPTRONIK GMBH 1995).

Der Inhalt des Projektes ist die Überprüfung neuer, moderner und zukunftssträchtiger Techniken der Geofernerkundung, der satellitengestützten Vermessung mit GPS (*Global Positioning System*) und der Integration und Verarbeitung von Geodaten in *Geografischen Informationssystemen* (GIS) hinsichtlich der Verwendbarkeit in der Landwirtschaft. Im Vordergrund steht dabei die Erstellung einer großmaßstäbigen, digitalen Kartengrundlage mit Flurstücksbezug (mit Feldgrenzen) in Form der Digitalen Feldgrenzenkarte (DFGK) (KRESSE 1996, S. 15). Auf der Grundlage der Digitalen Feldkarte soll eine Reihe von thematischen Anwendungen erstellt werden. In diesem Rahmen sind einige Diplomarbeitsthemen, wie die satellitengestützte Grünlandkartierung, die Aufnahme von Feldheterogenitäten, sowie die Untersuchung von Erosionsereignissen und -gefährdungspotentialen entstanden, die bei der Jenaoptronik GmbH erarbeitet werden können.

1 Einleitung

Die Fernerkundung der Oberfläche des Planeten hat eine lange Tradition. Anfangs konzentrierte sich das Tätigkeitsfeld auf fotografisch erzeugte Aufnahmen von Flugzeugen aus, doch mit der Zeit und den ständig neuen technischen Entwicklungen und Möglichkeiten erhielten Aufnahmen von orbitgestützten Satelliten Einzug in die Erdbeobachtung. Die Fernerkundung der Erde „stellt eine anerkannte und vielgenutzte Informationsquelle für kartografische, geodätische oder geowissenschaftliche Fragestellungen dar“ (BACKHAUS ET AL. 1995).

Fernerkundung für Umwelterfassung und Umweltschutz genießt zur Zeit große politische und öffentliche Anerkennung. Diese Akzeptanz verdankt sie zu einem großen Teil dem dringenden umweltpolitischen Handlungsbedarf angesichts der fortschreitenden globalen Umweltprobleme. Aufgrund des fehlenden Wissens über das Gesamtsystem Erde und seine regionalen Subsysteme wird eine nachhaltige Umweltbewirtschaftung erschwert. Die zukünftige ökologische und geowissenschaftliche Grundlagenforschung bedarf der Informationsbereitstellung durch Fernerkundung, die es ermöglicht, regelmäßige und kostengünstige Aufnahmen großflächiger Gebiete, die vielfach schwer zugänglich sind, heranzuziehen und Umweltveränderungen im regionalen und globalen Maßstab zu erkennen und zu verfolgen.

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Erderkundung zu einem eigenständigen, multidisziplinären Anwendungsgebiet entwickelt. In den verschiedensten Wissenschaftsbereichen wird heute versucht, multispektrale Information sowie Radaraufnahmen von Objekten für die Lösung von Fragestellungen heranzuziehen. Es ist eine problemorientierte, angewandte Forschung erforderlich, um an praktischen Anwendungen nachzuweisen, daß die in die Fernerkundung gesetzten Erwartungen langfristig erfüllt werden können.

Die Fernerkundung liefert Informationen über die spektralen Eigenschaften der verschiedenen, den Betrachter interessierenden Objekte. Die Aufnahmen können in verschiedener räumlicher, spektraler und zeitlicher Auflösung erstellt werden. Die große potentielle

Informationsbereitstellung, die durch die Fernerkundung realisiert werden kann, ist bislang nur zu einem geringen Teil bekannt und genutzt worden. In Zukunft bedarf es einer weiteren anwendungsorientierten Analyse des Informationsgehaltes multispektraler Datensätze, um die zur Verfügung stehenden Informationen vollständig auszunutzen. Nicht nur der technologischen Optimierung, sondern auch der Anwendungsoptimierung des Systems in Bezug auf Umweltfragen kommt eine große Bedeutung zu.

Die terrestrische Datenerhebung kann in der Regel nicht durch die Fernerkundung ersetzt werden. Sie ist vielmehr als zusätzliche, weiterführende Informationsquelle anzusehen. Die Zusammenführung der verschiedenen herkömmlich erhobenen Daten und der digitalen Fernerkundungsdaten kann auf der Basis Geografischer Informationssysteme (GIS) erfolgen. Mit den Geografischen Informationssystemen ist die Möglichkeit „zur Erweiterung des Merkmalsraums und damit zur Präzisierung der mit Fernerkundung gewonnenen Information durch zusätzliche, räumliche Daten gegeben“ (DOCKTER 1995).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll das Anwendungspotential optischer Satellitenaufnahmen für die Lokalisierung und Interpretation von Feldheterogenitäten untersucht werden. Es ist möglich, mit Hilfe von Fernerkundungsdaten Aussagen über Verteilungsmuster (räumliche Heterogenität) von Bodeneigenschaften und -bestandteilen an der Bodenoberfläche zu machen, die in Detaillierung und Lagegenauigkeit von terrestrischen Systemen nicht effektiv erbracht werden können. Die Schwierigkeit besteht dabei in der Bestimmung ihrer inhaltlichen Heterogenität (SCHRÖDER 1986).

Aufgrund des Interesses der TLL und der Jenaoptronik GmbH an dem Nutzungspotential der Fernerkundung im Bereich der Landwirtschaft geht die vorliegende Arbeit primär auf den landwirtschaftlichen Aspekt des Themas ein. Um einen Bezug zur universitären Ausbildung zum Landschaftsplaner und dessen Tätigkeitsfeld herzustellen, werden in Kapitel 5.5.1 die Anwendungsmöglichkeiten der Fernerkundung für landschaftsplanerische Aspekte herausgearbeitet.

Aus dem Ziel (*Kap.:* 2.2) heraus entwickeln sich die Vorgehensweise und der Aufbau der Arbeit. Einer Beschreibung des praktischen Hintergrundes der Problemstellung folgt die Darstellung der in der Arbeit verwendeten Datengrundlagen über das Untersuchungsgebiet und der zur Verfügung stehenden Fernerkundungsdaten. Um ein Verständnis für den

Informationsgehalt der optischen Fernerkundungsdaten zu erarbeiten, werden in einem weiteren Abschnitt die Grundlagen der Fernerkundung sowie der Reflexionseigenschaften natürlicher Oberflächen dargelegt. Diesen Ausführungen schließt sich der Bereich über die digitale Bildverarbeitung an, die eine Voraussetzung für die Interpretation der digitalen Datensätze ist. Der Abschnitt der Datenanalyse gliedert sich in zwei Bereiche auf: zum einen in die Beschreibung und den Vergleich von Karten- und Satellitenbildinformation, und zum anderen in die Korrelationsanalyse von Reflexionsverhalten des Bodens und den Bodeneigenschaften, bzw. Bodeneinhaltsstoffen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt in der visuellen Interpretation der Zusammenhänge, welche durch die Verfahren der computergestützten Klassifikation unterstützt wird.

Am Ende der Arbeit folgt eine Zusammenfassung und Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse und ein Blick in die Zukunft der Verwendung von Fernerkundungsdaten in umweltplanerisch orientierten Anwendungen.

2 Zielstellung und Methodik

2.1 Problemstellung

Vor dem Hintergrund einer notwendigen ökologischen Umgestaltung der Landwirtschaft wird ständig eine Reduzierung der Einträge, wie z. B. von Düngemitteln, Pestiziden usw., zum Schutz der Umwelt gefordert.

Die kleinräumigen Feldheterogenitäten in der Agrarlandschaft führen dazu, daß für alle Teilbereiche eines Schlages, die nicht den mittleren Standorteigenschaften entsprechen, die durchgeführten landbaulichen Maßnahmen aus ökologischer und ökonomischer Sicht nicht optimal sind, da der Landwirt sein Feld nach der Vorgabe des standörtlichen Mittelwertes bearbeitet. Bei undifferenzierter Reduzierung der landwirtschaftlichen Einträge kann es einerseits zu unökologischer Überversorgung, andererseits aber auch zu ökonomischer Unterversorgung der einzelnen Teilschläge kommen (KRESSE 1996). Insbesondere bei der Feldbearbeitung kann sich ein Nichtbeachten der unterschiedlichen Bodeneigenschaften negativ auf den Standort auswirken. Eine zeitlich homogene Bewirtschaftung eines heterogenen Schlages führt bei einer zu frühen Bearbeitung noch feuchter Teilbereiche zu nachhaltigen Schädigungen in der Bodenstruktur. Sie zeigen sich in verstärkter Bodenverdichtung mit einhergehenden Ertragseinbußen und einer Erhöhung der Erosionsgefährdung des Standortes.

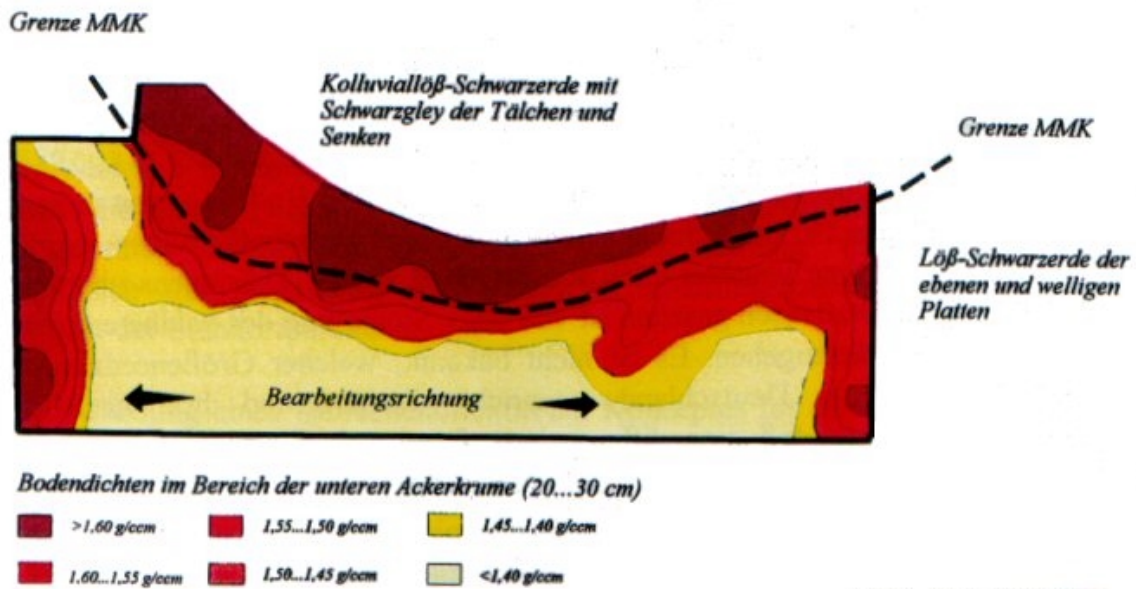


Abb. 1: Variabilität der Bodendichten auf einem Schlag (nach WERNER 1996, unveröffentlicht).

Die heutigen Grundlagendaten über bodenbedingte Standortverhältnisse auf den Feldschlägen (vgl. Kap.: 3.2.3 und 3.2.4) weisen zwar differenzierte Areale unterschiedlicher Bodenklassen aus, doch lassen diese im Hinblick auf zukünftiges Teilschlagmanagement („computer aided farming“) Defizite in ihrer Genauigkeit der Abgrenzungen erkennen. Für die effektive, teilflächenorientierte Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Nutzfläche ist eine Bodeninventur in einer Informationsdichte notwendig, die sich an der Geräte- bzw. Fahrgassenbreite orientiert. Sie sollte zwischen 5 m und 20 m liegen (LAMP und GOTTFRIED 1994). Die Kenntnis von kleinräumigen ertrags- und umweltrelevanten Bodenheterogenitäten und deren Umsetzung in ein Kartenwerk der Bodennutzungsseignung in analoger wie auch digitaler Form ist für das Ziel der teilflächenspezifischen Bodenbearbeitung mit einem hohen Wirkungsgrad unerlässlich.

Mit Hilfe floristischer Parameter läßt sich das Maß an Heterogenität eines Schlages relativ leicht erheben, aber eine Aussage über die Ursachen der Unterschiede ist nicht möglich. Es ist also eine neue, weiterreichende Aufnahme von Bodeneigenschaften nötig, die dem Genauigkeitsanspruch des zukünftigen „computer aided farming“ oder auch „Precision farming“ gerecht werden kann. Besonderer Wert sollte dabei auf digitale Daten gelegt werden, die in Geografischen Informationssystemen verarbeitet werden können.

Eine Möglichkeit, diesem Genauigkeitsanspruch gerecht zu werden, könnte zum Beispiel die Fernerkundung darstellen, die es erlaubt, einen Schlag in seiner Gesamtheit und im Detail zu betrachten (AMON 1994). Die Fernerkundung liefert Informationen über die Heterogenität eines Schlages, mit deren Hilfe in sich homogene Teilschläge abgegrenzt werden können. Das Problem besteht in der qualitativen Überprüfung dieser Abgrenzungen. Sollten satellitengetragene Sensoren neuartige, umfassendere, kostengünstigere und raschere Informationen liefern können, als es mit konventionellen Datenquellen möglich ist, würde die Attraktivität der Fernerkundung für die praktische Anwendung immens steigen. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die in den Satellitendaten abgebildete Information lediglich aus dem Oberboden (Ap-Horizont) stammt und nicht unbedingt Rückschlüsse auf die anstehenden Bodenhorizonte und deren Eigenschaften erlaubt. KÜHBAUCH ET AL. (1997) sehen für die Fernerkundung insbesondere aufgrund der Aktualität der gelieferten Daten eine wachsende Rolle in der Datenakquisition.

2.1.1 Feldheterogenitäten

Auf den teilweise über 50 ha großen Schlägen der Thüringer Landwirtschaft, die in Folge der landwirtschaftlichen Struktur durch Feldbereinigung und Kollektivierung in der ehemaligen DDR entstanden sind, ist keineswegs von einer Homogenität der Bodenfruchtbarkeitsmerkmale auszugehen. Untersuchungen von LAMP UND SCHNUG (1987) in Norddeutschland zeigten, daß die Variabilität einzelner Merkmale des Bodens schon innerhalb eines Schlages von 10 ha Fläche Größenordnungen wie in ganzen Landschaftsräumen erreichen kann. Diese Erkenntnis kann ohne weiteres auch auf die Großschläge Thüringens übertragen werden (KRESSE 1996). Statistisch gesehen ist von einer Steigerung der Feldheterogenität mit Zunahme der Feldgröße auszugehen. Es ist nicht bekannt, welcher Größenordnung die landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland entspricht, die aufgrund ihrer natürlichen Gegebenheiten so heterogen ist, daß eine differenzierte Bewirtschaftung angebracht wäre. Nach Schätzungen von SCHNUG UND HOLST (1994) sind davon bis zu 2/3 der Ackerfläche betroffen (KTBL 1994).

Die Ursache für diese Variabilität ist hauptsächlich im geologischen Ausgangsmaterial und in vorhandenen Erosionserscheinungen zu suchen. Auch unterschiedliche mikroklimatische Verhältnisse, die eine Rolle in der Bodenentwicklung spielen, trugen im Laufe der Zeit zu

einer Heterogenisierung der physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften bei. Bei den vorhandenen Heterogenitäten handelt es sich hauptsächlich um natur-, aber auch nutzungsbedingte Kontraste im Abtrocknungsverhalten, im Wasserversorgungspotential, in der Nährstoffspeicherung und -verfügbarkeit und in der Erosionsdisposition zwischen verschiedenen Teilbereichen eines Schlages.

In der Agrarlandschaft vorkommende Feldheterogenitäten lassen sich über verschiedene Herangehensweisen mittels optischer Satellitenaufnahmesysteme lokalisieren. Die Betrachtung der vegetationslosen Bodenoberfläche ermöglicht eine Differenzierung von Flächen verschiedener Bodeneigenschaften, bzw. Bodeneinhaltsstoffkombinationen. Die in den Aufnahmen erkennbaren Heterogenitäten liegen im Ap-Horizont vor und lassen kaum Rückschlüsse auf die Eigenschaften und das Profil des mineralischen Bodenkörpers zu. Heterogenitäten des Ap-Horizontes können auch durch eine unterschiedliche Bearbeitung hervorgerufen werden.

Die Bodenfeuchtigkeit stellt ein weiteres Kriterium dar, mit welchem sich heterogene Areale eines Feldschlages abgrenzen lassen. Sie läßt ab einem bestimmten Bodenwassergehalt andere Bodenparameter reflexionsunwirksam werden. Für die Lokalisierung von Feldheterogenitäten kann außerdem ein unterschiedlich ausgeprägter Pflanzenbestand als Indikator dienen. Auf die verschiedenen Herangehensweisen zur Lokalisierung standörtlicher Bodenheterogenitäten wird in *Kapitel 6.5* vertieft eingegangen.

2.1.2 Mögliche Reaktionen auf vorhandene Feldheterogenitäten

Mit der Erkennung und Lokalisierung der vorhandenen Heterogenitäten ist aber noch nichts für die Umweltverträglichkeit der Landnutzung getan, sondern vielmehr nur die Vorarbeit für tiefgreifendere Maßnahmen geleistet. Eine Beseitigung der Feldheterogenität durch Schlagteilung auf eine ökonomisch verträgliche Größe ist eine naheliegende Reaktion. Damit einhergehend besteht die Möglichkeit der Ansiedlung strukturbildender Elemente, wie Feldgehölze und Hecken, entlang der neuen Schlaggrenzen, die als lineare Bestandteile eines Biotopverbundsystems dienen könnten und positive Auswirkungen auf den Artenschutz hätten. Des weiteren dienen Hecken zur Verkürzung der erosiven Hanglänge und stellen ein probates Mittel zur Eindämmung erosiver Prozesse dar.

Unter den heutigen globalen, marktwirtschaftlichen Gegebenheiten ist derzeit nicht davon auszugehen, daß vorhandene Großschläge in kleinere Einheiten unterteilt werden, da die Konkurrenzfähigkeit auf dem Weltmarkt in Frage gestellt werden könnte. Auch wenn die europäische Agrarpolitik sehr subventionsgesteuert ist, spielt die Wirtschaftlichkeit der Agrarproduktion trotzdem eine Rolle, um die Höhe der Subventionen zu minimieren. Ein Konzept, die Landwirtschaft trotzdem nachhaltiger zu gestalten und auf die standörtlichen Heterogenitäten zu reagieren stellt das „Precision farming“ dar. Hinter diesem Konzept verbirgt sich die Anpassung der Landbewirtschaftungsmaßnahmen an die vorhandene Variabilität der Standortparameter.

„Die Entwicklung eines teilflächenorientierten Konzeptes für die Pflanzenproduktion verlangt die Unterteilung eines Schläges in homogene Untereinheiten“ (AMON 1994). Die spezifische Bewirtschaftung der Teilflächen verfolgt das Ziel der Optimierung des Betriebsmitteleinsatzes auf jedem einzelnen Teilschlag und soll zu einer Effektivitätssteigerung und Einsparung beim Produktionsmitteleinsatz führen. Mit dieser teilflächenspezifischen Bearbeitung kann ein wichtiger Beitrag zur ökologischen Zielsetzung einer nachhaltigen, integrativen und umweltschonenden Landwirtschaft geleistet werden. Die bessere Kontrolle des Dünger- und Pestizideinsatzes zieht eine Reduzierung der gesellschaftlichen Folgekosten (z. B. Trinkwasserreinigung) im Umweltbereich nach sich. Im Rahmen des Ressourcenschutzes wird durch die zeitlich optimierte Bearbeitung der Teilschläge die nachhaltige Ertragsfähigkeit der Ackerböden gesichert.

Für die Anpassung der großflächigen Bodennutzung an das vorhandenen Standortmosaik gibt es drei Grundstrategien (TLL 1996):

1. Nutzungsanpassung durch Ausgleichsmaßnahmen, wie Düngung und Bedarfsdränung auf „Stör- und Minimalarealen“
2. Nutzungsanpassung durch Feldteilung, d. h. Abtrennung und gesonderte Nutzung stark kontrastierender Teilflächen
3. Nutzungsanpassung durch Dosierung, d. h. kleinflächige Differenzierung pflanzenbaulicher Maßnahmen entsprechend den Heterogenitäten mit Hilfe computergesteuerter Applikationsinstrumente.

Die Grundvoraussetzung für die Teilschlagbewirtschaftung ist die Verfügbarkeit zuverlässiger Information über die räumliche und zeitliche Variabilität produktionsrelevanter Parameter, wie Bodennährstoffgehalt, Bodenart und -typ und Ertragshöhe. Es ist demzufolge eine flächenkonkrete Darstellung von Basisinformationen über die innere Ausstattung des Feldes notwendig (WERNER ET AL. 1995, nach HOPF 1998). Für eine „ortsdifferenzierte Behandlung unterschiedlicher Bereiche eines Schlags“ (EHLERT ET AL. 1997), d.h. einer Nutzungsanpassung durch z. B. punktuelle, dem jeweiligen Bedarf genau angepasste Dosierung der Düngemittel, ist zum einen ein punktgenaues Navigieren auf dem Feld unabdinglich, und zum anderen müssen die standortbezogenen Kennwerte geografisch festgelegt sein (KTBL 1994). Es werden rechnerlesbare Informationen über die Lage und Größe von Kontrastarealen im Feldmaßstab benötigt, die auf der Basis eines Geografischen Informationssystems (GIS) verarbeitet und genutzt werden können.

Seit Anfang der 90er Jahre sind derartige Bewirtschaftungskonzepte realisierbar. Mit der Verfügbarkeit des *Global Positioning System (GPS)* für zivile Zwecke ist die punktgenaue Navigation auf dem Feld Wirklichkeit geworden. Hohe Lagegenauigkeiten werden allerdings nur erzielt, wenn ein sogenanntes Differential-GPS (DGPS) verwendet wird. In der landwirtschaftlichen Anwendung werden Positionsgenauigkeiten von etwa 2,5 m angestrebt (BILL ET AL. 1996). Über das GPS hinaus sind außerdem noch raumbezogene Erfassungs- und Auswertesysteme (GIS) weiterentwickelt worden in denen die raumbezogenen Informationen integriert und verarbeitet werden. Nur diese Geografischen Informationssysteme gewährleisten eine gemeinsame Verwaltung aller Daten in einem einheitlichen Raum- und Zeitbezug (BILL ET AL. 1996). Mit Hilfe digitaler Feldkarten und einem leistungsfähigen Bordcomputer auf den Landwirtschaftsmaschinen ist es möglich, punktspezifische Entscheidungen bei der Feldbearbeitung auszulösen.

Schwierigkeiten gibt es derzeit noch bei der schnellen und kostengünstigen Erhebung und Verarbeitung der benötigten, umfangreichen Datenmengen. Dies gilt insbesondere für die Darstellung von Bodenheterogenitäten innerhalb der Felder, ohne die eine Optimierung des Wirkungsgrades des Teilschlagmanagements nicht erreicht werden kann.

Die ökologische Bewertung einer Teilschlagbewirtschaftung fällt durchweg positiv aus (AMON 1994), da jeder Teilschlag entsprechend seiner Voraussetzungen genutzt und ein hoher Düngemittelwirkungsgrad erzielt wird. In dem „Computer aided farming“ (CAF) liegt

insgesamt ein großes Potential für ein verbessertes optimiertes Bodenmanagement (LAMP UND BASTEN 1994), und es trägt zudem noch dem Ressourcenschutz bei. Die ökonomische Beurteilung dagegen liefert sehr unterschiedliche Ergebnisse, da die Einsparungen und Mehraufwendungen in den Bereichen Pflanzenschutz und Düngung von Standort zu Standort in beträchtlichem Maße variieren (AMON 1994).

Die Rentabilität des Gesamtsystems der Teilschlagbewirtschaftung ist derzeit noch nicht gegeben. Die hohen Anschaffungskosten für die neuen benötigten Techniken und für die Datenerhebung sind in der Summe noch zu hoch, um den Nutzen aus der Einsparung der Betriebsmittel effizient zu gestalten. Die Teilschlagbewirtschaftung wird in Zukunft dennoch interessant sein, „weil veränderte ökonomische Voraussetzungen, wie billigere Elektronik und Software, vermehrte gesetzliche Bewirtschaftungsauflagen, überbetrieblicher Maschineneinsatz, noch größere und spezialisiertere Betriebe den rentablen Einsatz teilschlagorientierter Wirtschaftsweisen ermöglichen werden“ (AMON 1994). Insbesondere die gesetzlichen Rahmenbedingungen, wie z. B. die Düngemittelverordnung, die Wasserschutzgebietsverordnung oder auch die EG-Subventionsförderungsregeln setzen vermehrt flächenspezifisches Handeln des Landwirts voraus, das von ihm auch dokumentiert und nachweisbar sein muß. Die in Zukunft verstärkt zu erwartenden Restriktionen des Betriebsmitteleinsatzes zur Minimierung der ökologischen Nebenwirkungen durch die Landwirtschaft werden möglicherweise nur durch den Einsatz eines teilschlagorientierten Bewirtschaftungskonzeptes wirtschaftlich zu verkraften sein. „Dies läßt sich nur durch einen integrativen Ansatz im Sinne eines landwirtschaftlichen Betriebsinformationssystems realisieren, in dem modernste Techniken zum Einsatz kommen“ (BILL ET AL. 1996).

Die Rentabilität solcher Techniken ist nur bei genügend großen Flächen gegeben. SCHNUG UND HOLST (1994) haben mittels einer Modellrechnung, die jedoch einige Kosten nicht berücksichtigt, die Rentabilitätsschwelle für Winterweizen mit einer Fläche von 100 ha beziffert.

2.2 Zielstellung

Wie bereits erwähnt weisen die heutigen Grundlagendaten über bodenbedingte Standortverhältnisse auf den Feldschlägen (MMK und RBS) Defizite in ihrer Genauigkeit der Abgrenzungen auf. Die differenziert dargestellten Bereiche unterschiedlicher Bodenklassen sind nicht ausreichend genug, um ein effektives Teilschlagmanagement durchführen zu können. Je genauer die Kenntnisse über die Lage und die Art der Heterogenitäten sind, desto größer ist der mögliche Wirkungsgrad des „precision farming“.

Das Ziel der Untersuchung soll daher die Analyse des Informationsgehaltes von Satellitendaten in Bezug auf den Boden sein. Hierbei soll überprüft werden, ob Satellitenaufnahmen die in den vorhandenen Kartenwerken dargelegten Heterogenitäten bestätigen, und ob sie möglicherweise eine weitere, aussagefähigere Datenebene darstellen können, die wiederum eine genauere Differenzierung der Standortgegebenheiten ermöglicht. Der Nachweis von den in der RBS dargestellten Feldheterogenitäten im Satellitenbild wäre schon ein sehr brauchbares Ergebnis, da dieses Kartenwerk die bisher genaueste Darstellung der standortbedingten Fruchtbarkeitsunterschiede (WEVER 1989) ist. Es soll weiterhin untersucht werden, ob sich Aussagen zu der Beschaffenheit der Heterogenitäten machen lassen, indem z. B. einige Bodenparameter direkt über die Satellitendaten quantitativ bestimmt oder angesprochen werden können. Mit Hilfe der Korrelationsanalyse werden mögliche Zusammenhänge zwischen dem Reflexionssignal des Bodens und einzelner Bodeneinhaltsstoffe dargelegt. Die Arbeit soll Herangehensweisen aufzeigen, die eine Überprüfung qualitativer Abgrenzungen heterogener Gebiete ermöglichen. Von besonderem Interesse ist dabei der Umfang an terrestrischer Information, der zur Interpretation fernerkundlicher Daten mindestens notwendig ist. Weiterhin ist für diese Fragestellung relevant, ob diese Feldinformationen auf rationelle Weise beschafft werden können.

Im Rahmen der Arbeit wird ein Verständnis für den Informationsgehalt optischer Satellitenaufnahmen im Bereich der Bodenbeobachtung entwickelt, und das Anwendungspotential dieser Daten- und Informationsquelle hinsichtlich der Lokalisierung, Klassifikation und Interpretation von Feldheterogenitäten für die Landbewirtschaftung erforscht. Dabei kann das Ziel nicht die Darstellung unterschiedlicher Bodentypen sein, sondern vielmehr die Ausweisung von Flächen unterschiedlicher Eigenschaftskombinationen und Entwicklungsstände (KOROLYUK 1994).

2.3 Methodische Herangehensweise

Für die Bearbeitung des Themas werden zwei verschiedene Aspekte betrachtet:

- Überprüfung der Karteninformation anhand der Satellitendaten
- Analyse des Informationsgehaltes von Satellitendaten in Bezug auf die Bodeneigenschaften, bzw. Bodeninhaltsstoffe

Vor der Bearbeitung des eigentlichen Themas werden die verwendeten Datengrundlagen (*Kap.: 3*) und der bearbeitete Untersuchungsraum inklusive der speziellen Testschläge (*Kap.: 4*) dargestellt und analysiert. In *Kapitel 5* werden kurz und knapp die physikalischen und technischen Grundlagen der Fernerkundung aufgezeigt, sowie ein Vergleich der beiden zur Anwendung gekommenen Aufnahmesysteme, Landsat-TM und IRS-1C, angestellt (*Kap.: 5.3.2*).

Der Untersuchungsraum wird nach verschiedenen Kriterien ausgewählt (*Kap.: 4.1*). Aus der multispektralen Gesamtszenen der Aufnahmesysteme Landsat-TM und IRS-1C werden Subimages des Untersuchungsgebietes „ausgeschnitten“, die im Folgenden bearbeitet werden.

Aufgrund der Zielstellung der Arbeit sind die Untersuchungen auf vegetationslose Agrarstandorte des Untersuchungsraumes (*Kap.: 4.1*) konzentriert, um ein unverfälschtes, spektrales Abbild des Bodens und dessen chemischen und physikalischen Eigenschaften betrachten zu können (*Kap.: 6.5*). Andere mögliche Herangehensweisen zur Lokalisierung von Feldheterogenitäten werden in *Kapitel 6.5* dargestellt und analysiert, aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, obwohl auch mit ihnen brauchbare Ergebnisse erzielt werden können.

Zum Zeitpunkt der Aufnahmen des Landsat-TM vom 22.09.1997 und des IRS-1C vom 25.09.1997 war ein großer Umfang der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Untersuchungsraum (*Kap.: 3.1.2*) mit Vegetation bedeckt. Für die Ermittlung vegetationsloser Standorte wird von dem verwendeten Ausschnitt der Satellitenszene - mit Mitteln der digitalen Bildverarbeitung - ein Vegetationsindex (*Kap.: 7.4.1*) berechnet. Die Flächen, deren Vegetationsbedeckung eine visuelle und digitale Klassifizierung des Bodens und dessen Eigenschaften von vornherein ausschließen, werden aufgezeigt. Diese Bereiche der Satellitenszene können maskiert und von der weiteren Bearbeitung ausgegrenzt werden. Die

weiterverwerteten Daten werden mit bildverbessernden Methoden der Datenverarbeitung (*Kap.: 7.2 und 7.3*) manipuliert, um möglichst gut interpretierbare Darstellungen zu erhalten.

Aus den vegetationslosen Flächen werden stichprobenartig verschiedene Testschläge ausgewählt (*Kap.: 4.4.2*) und in dem modularen GIS JENATOP mit der vektorisierten Karteninformation der RBS und der MMK überlagert. Die visuelle Betrachtung der spektralen Daten wird durch eine Farbdarstellung vereinfacht. Für die Ermittlung der informativsten Kanalkombination für die Farbdarstellung wird der *Optimum index factor* (*Kap.: 7.4.2*) berechnet und verwendet. Über die Kombination des Farbbildes mit den *Ground truth* Daten der RBS (*Kap.: 3.2.3*) und der MMK (*Kap.: 3.2.4*) können erste Erkenntnisse über die Heterogenität der Schläge (*Kap.: 8.1.1*) im Untersuchungsraum beschafft werden. Diese wird anhand der Analyse der Einzelkanaldarstellungen (*Kap.: 8.1.1*) bestätigt. Aus beiden Darstellungen werden spektral heterogene Bereiche eines Schlages definiert, aus denen Meßpunkte für die Bodensignaturanalyse (*Kap.: 8.1.1*) entnommen werden. Durch die Informationen der Bodensignaturdiagramme kann die Interpretation der Ursache für die spektralen Feldheterogenitäten verbessert werden.

Die Grundlage für die Interpretation der Heterogenitäten bilden die bisher von anderen Autoren gewonnenen Erkenntnisse über die spektralen Eigenschaften reflexionswirksamer Bodenparameter. In *Kapitel 6* werden die Kernaussagen der bisherigen Forschungen zusammenfassend dargestellt, auf die sich die Analyse und Interpretation der spektralen Signatur der Feldheterogenitäten in dieser Arbeit begründet.

Eine objektive Trennung der heterogenen Teilbereiche wird mit einer unüberwachten Klassifikation (*Kap.: 7.5.1 und Kap.: 8.1.2*) der einzelnen, ausgewählten Testschläge erreicht. Die Abgrenzung nach spektralen Eigenschaften dient der Gewinnung potentieller Beprobungsflächen, auf denen vereinzelte Stichproben genommen werden können, deren Ergebnis näherungsweise für die gesamte Teilfläche herangezogen werden kann. Ein entsprechendes Feldprogramm wird im Rahmen der Arbeit nicht durchgeführt, ist aber für eine gesicherte Interpretation der spektralen Heterogenität unabdinglich.

Ein weiterer Bearbeitungsschritt in der Auswertung der Daten ist die überwachte Klassifikation (*Kap.: 7.5.2*) des gesamten Untersuchungsraumes (*Kap.: 8.1.3*) hinsichtlich der Abgrenzung von Gebieten unterschiedlichen geologischen Ausgangsmaterials, sowie im

Hinblick auf die vorher visuell lokalisierten Heterogenitäten (*Kap.: 8.1.1*). Die Klassifizierungsergebnisse werden im nachhinein an den verschiedenen Testschlägen verifiziert (*Kap.: 8.1.3.3*). Für die Ermittlung von geeigneten Trainingsgebieten für die überwachte Klassifikation (*Kap.: 8.1.3.1*) gelangt ein hybrider Klassifikationsansatz zur Anwendung (*Kap.: 7.5.1*).

Im Rahmen der Interpretation der optischen Fernerkundungsdaten wird auf die Notwendigkeit einer umfassenden Datenerhebung im Gelände hingewiesen, welche im Rahmen der Arbeit nicht gegeben war. Aufgrund der ungenügenden Kenntnisse über die standörtlichen Eigenschaften sind kaum gesicherte Aussagen über Ursachen der Feldheterogenitäten möglich. Die das Reflexionssignal verfälschenden äußeren Einflüsse werden in Kapitel 5.4 betrachtet und im Rahmen der Interpretation berücksichtigt und hervorgehoben.

Die Bearbeitung des zweiten Aspektes, die Analyse der Korrelation zwischen Reflexionssignal und verschiedenen Bodenparametern, wird mit den Fernerkundungsdaten des IRS-1C vom 01.09.1997 durchgeführt (*Kap.: 8.2*). Für diese analytische Betrachtung werden vorher die Ergebnisse der Felduntersuchung von Schlag 211 ausgewertet (*Kap.: 3.2.5* und *8.2.2*), sowie die Grauwertverteilung visuell analysiert und eine Bodensignaturanalyse von Bereichen unterschiedlicher Reflexionsintensität erstellt (*Kap.: 8.2.1*). Anhand der umfassenden Datengrundlage für diesen Schlag soll eine sicherere Aussage über mögliche Korrelationen getroffen werden, als es bei den anderen Testschlägen aufgrund der geringen *Ground truth Information* möglich ist.

Die Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse und ein Überblick über die mögliche Lokalisierung von Feldheterogenitäten bildet den Abschluß der Arbeit. Dabei wird noch einmal dargestellt, welche Bodenparameter in dem betrachteten Untersuchungsraum über ihre spektralen Eigenschaften abgegrenzt werden können. Es wird des weiteren darauf eingegangen, in welchem spektralen Aufnahmebereich der verwendeten Scannersysteme die jeweiligen Bodenelemente ihre Reflexionswirksamkeit entfalten.

3 Datengrundlagen

In diesem Kapitel werden alle in der Arbeit verwendeten Daten aufgeführt und beschrieben. Die Datengrundlage besteht aus fernerkundlichen und konventionell erhobenen Informationen über den Untersuchungsraum, die in einem Geografischen Informationssystem integriert und analysiert werden.

3.1 Satellitenszenen

Für die Bearbeitung des Themas wurden von der Firma Jenaoptronik GmbH verschiedene Satellitenszenen des Landsat-5 Thematic Mapper (TM) sowie des IRS-1C (*Kap 5.3.2*) in geokodierter Form zur Verfügung gestellt.

Tab. 1: Aufnahmedaten der verwendeten Szenen

Sensor	Aufnahmedatum	Überflugzeit	Path	Row
Landsat-5-TM	22.09.1997	8:56 h	194	25
IRS-1C	25.09.1997	11:26 h	26	32
IRS-1C	01.09.1997	11:24 h	26	32

Die Daten wurden von den Vertreibern in systemkorrigierter Form geliefert und von Mitarbeitern der Jenaoptronik GmbH mit dem Softwareprogramm JENATOP geokodiert. Für die Geokodierung der Daten wurde das geodätische Gauß-Krüger-Koordinatensystem als Referenzsystem verwendet (*Kap.: 7.2*). Die Geokodierung wurde unter Verwendung eines *Digitalen Geländemodells (DGM)*, dem die Gauß-Krüger Koordinaten zugrundeliegen, durchgeführt. Als Berechnungsgrundlage wurden 12° breite Meridianstreifen genutzt. Während der geometrischen Korrektur wurde die eigentliche Pixelgröße der Landsat-TM Szene von 30 m auf 25 m interpoliert. Diese Interpolation war nötig, da das zugrundeliegende DGM einen Maßstab von 1:25000 hat. Die Daten des IRS-1C-LISS 3 werden mit einer Pixelgröße von 25 m vom *Geoforschungszentrum Potsdam* ausgeliefert, was eine Interpolation der Pixelgröße bei der Geokodierung auf das digitale Höhenmodell hinfällig macht. Die durchgeführte Geokodierung führte zu einer Vereinheitlichung der räumlichen

Auflösung beider Aufnahmesysteme. Aufgrund der Interpolation bei den TM-Daten stellt sich das resultierende Bild etwas „unschärfer“ dar, als die IRS-1C Aufnahme.

Die geometrische Transformation der Bilddaten auf das geodätische Bezugssystem ist notwendig, um die Abbildung der gekrümmten Erdoberfläche in der gewählten Kartenprojektion abzubilden. Des weiteren werden vorhandene geometrische Verzerrungen minimiert (*Kap.: 5.3.1 und Kap.: 7.2*).

Im Rahmen der Arbeit kommen nicht alle zur Verfügung stehenden spektralen Aufnahmekanäle zum Einsatz. Bei den Daten des Landsat-TM wird auf den thermalen Infrarotkanal (TM-6) verzichtet, da dieser aufgrund seiner geringeren geometrischen Auflösung für die zu bearbeitende Fragestellung ungeeignet erscheint. Von den IRS-1C LISS 3 Daten werden nur die drei multispektralen Kanäle LISS 1-3 verwendet. Die hochauflösende panchromatische Aufnahme wurde aus zeitlichen Gründen nicht in die Untersuchung einbezogen, obwohl sich die Kombination mit multispektralen Daten mittels der IHS-Transformation durchaus in anderen Arbeiten als zweckmäßig erwiesen hat (ALBERTZ 1991).

3.1.1 Witterung zum Zeitpunkt der jeweiligen Aufnahmen

Zur Beschreibung der klimatischen Gegebenheiten zum Zeitpunkt der jeweiligen Aufnahmen werden die Klimadaten aus dem *Agrarmeteorologischen Wochenbericht* für Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen entnommen, der wöchentlich vom Deutschen Wetterdienst, Geschäftsfeld Landwirtschaft, Außenstelle Halle, herausgegeben wird. Für genauere Informationen über die Niederschlagssituation innerhalb des Untersuchungsraums werden die Niederschlagsdaten, die von der Lysimeterstation der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft bei Buttstedt aufgezeichnet werden, von drei Wochen vor dem Aufnahmezeitpunkt herangezogen. Die Wetterlage der beiden Aufnahmezeitpunkte 22.09.1997 und 25.09.1997 wird zusammengefaßt, da die Aufnahmen sehr dicht aufeinander folgen und die klimatischen Bedingungen kaum verändert waren. Zu der Atmosphärentrübung zum Aufnahmezeitpunkt läßt sich aus der verfügbaren Datengrundlage keine Aussage treffen. Die Atmosphärentrübung kann jedoch eine große Auswirkung auf das Abbild haben und einen Vergleich der verschiedenen Aufnahmezeitpunkte erschweren, bzw. das Ergebnis fragwürdig erscheinen lassen (*Kap.: 5.4.1*).

Aufnahmezeitpunkte 22.09.1997 und 25.09.1997

Die letzten drei Wochen vor dem Aufnahmedatum stellten sich als ziemlich wechselhaftes Spätsommerwetter dar. In der Woche vom 1.9.-7.9.1997 war der Wetterablauf von einem Wechsel von Bewölkung, zeitweisem Sonnenschein und leichten Schauern geprägt. Die gefallenen Niederschlagsmengen lassen sich aus der Tabelle 2 entnehmen. Die Niederschläge waren jedoch von so geringer Intensität, und die Verdunstung war ausreichend hoch, so daß sich die negative, klimatische Wasserbilanz des Bodenkörpers, die sich im Vormonat in Thüringen aufgebaut hatte, fortsetzte. Sie schwankte zwischen minus 7 mm und minus 24 mm. Auch in der folgenden Woche setzte sich diese negative Wasserbilanz fort, doch verbesserte sie sich geringfügig (-13 mm bis -1 mm), da es aufgrund zugeströmter Kaltluft zu Temperaturabsenkungen kam, und gegen Ende der Woche schauerartige Niederschläge über dem Gebiet niedergingen. Die Niederschläge führten in der oberen Bodenkrume zu einer gewissen Durchfeuchtung, doch blieb in Bodentiefen von 10-15 cm das hohe Wasservorratsdefizit erhalten.

Im Wochenverlauf vor dem Aufnahmezeitpunkt, am 22.09.1997, fiel kein meßbarer Niederschlag, und die niederschlagsfreie bzw. -arme und einstrahlungsreiche Witterung führte dazu, daß, Modellrechnungen zufolge, die nutzbare Feldkapazität auf einigen Standorten nur 0-25 % betrug. Auch am Tag des Überfluges des Satelliten fiel kein Niederschlag, so daß man bei den vorliegenden Bilddaten von einem ausgetrockneten Oberboden ausgehen kann. Die gleichen klimatischen Verhältnisse setzten sich bis zum 25.09.1997 fort.

In der folgenden Tabelle sind die Tage eingetragen, an denen meßbarer Niederschlag im Untersuchungsraum gefallen ist. Dabei wird ein Zeitraum von drei Wochen vor dem Aufnahmezeitpunkt betrachtet, um sich ein Bild über den Bodenwassergehalt machen zu können.

Tab. 2: : Niederschlagsmenge vor dem 25.09.97 (Lysimeterstation bei Buttelstedt).

Datum	Niederschlags- menge in mm
13.09.1997	3.9
12.09.1997	3.7
09.09.1997	0.3
06.09.1997	1.8
05.09.1997	0.9
03.09.1997	0.1

Aufgrund der klimatischen Gegebenheiten konnte der Boden gut austrocknen, und dadurch ein unverfälschteres spektrales Abbild liefern, als es bei feuchten Böden der Fall ist. Die bei einem ausgetrockneten Boden vorhandenen Heterogenitäten in seinem spektralen Verhalten beruhen auf seinen chemischen und physikalischen Eigenschaften. Feldheterogenitäten können auch über einen unterschiedlichen Feuchtegehalt nachgewiesen und interpretiert werden. Diese Herangehensweise wird in dieser Arbeit jedoch nicht mit praktischen Untersuchungen verfolgt, sondern es wird in *Kapitel 6.6* lediglich auf die Möglichkeiten dieser Methode eingegangen.

Aufnahmezeitpunkt 01.09.1997

In der ersten Hälfte des Monats August herrschte sonnenscheinreiches Wetter mit intensiver Einstrahlung vor. Die Wochensummen der Sonnenscheindauer lagen mit 52 % - 77 % über den langjährigen Durchschnittswerten. Durch fehlende nachhaltige Überregnung, hohe Bodenwärme und einen hohen atmosphärischen Verdunstungsanspruch aufgrund geringer Luftfeuchte verschärfte sich die Bodentrockenheit in diesem Zeitraum, so daß die Böden vielerorts Verhärtungs- und Verkrustungserscheinungen ausbildeten.

In der zweiten Monatshälfte kam es verbreitet zu schauerartigen, teils gewittrigen Regenfällen (*Tab.: 3*), die aber aufgrund der sehr hohen Werte der potentiellen Verdunstung kaum zu einer positiven klimatischen Wasserbilanz im Bodenkörper führten. An vereinzelten Orten führten die Niederschläge zu Verschlämmungen und Staunässe im Oberboden, sowie zur Durchfeuchtung der obersten Bodenschicht. Infolge der hohen Verdunstungswerte wurden diese Wassermengen jedoch nicht bodenwirksam. Für die Betrachtung der Satellitenaufnahme wird davon ausgegangen, daß diese geringen Wassermengen ebenfalls nicht

fernerkundungsrelevant sind. Zu diesem Aspekt ließ sich keine konkretere Aussage treffen, da über den genauen Bodenwassergehalt zum Aufnahmezeitpunkt keine Daten vorlagen.

Tab. 3: Niederschlagsmengen vor dem 01.09.1997 (Lysimeterstation Buttstedt).

Datum	Niederschlags- menge in mm
29.08.1997	0.3
28.08.1997	14.1
27.08.1997	0.6
26.08.1997	26.9
23.08.1997	1.9
22.08.1997	0.1
19.08.1997	10.1
18.08.1997	4.4
15.08.1997	4.5

3.1.2 Stand der Landbearbeitung zum Zeitpunkt der Aufnahmen

Im nachhinein ist es in der Regel nicht sehr einfach, Aussagen über den Stand der Landbearbeitung zum Zeitpunkt der Aufnahme zu machen. Ein glücklicher Umstand war, daß bei der Jenaoptronik GmbH zur Zeit der Untersuchung ein Projekt lief, in dessen Rahmen, zumindest für einzelne Beobachtungsflächen, eine monatliche Fotodokumentation angelegt wurde. Mit Hilfe der Fotos vom 16.09.1997 und einem erstellten *Normalized Difference Vegetationsindex (NDVI)* (Abb. A-1), der an späterer Stelle beschrieben wird (Kap.: 7.4.2), ist es möglich, zwischen verschiedenen Bearbeitungsständen der Schläge im Untersuchungsgebiet zu differenzieren. Hierbei wird vorausgesetzt, daß der Zusammenhang zwischen den Fotos und der Farbe der Flächen im Vegetationsindex auch auf die nicht fotografisch dokumentierten Schläge zu übertragen ist.

Die Bearbeitungsstände der einzelnen Schläge im Untersuchungsgebiet wiesen am 22.09.1997 und am 25.09.1997 eine große Variationsbreite auf. Zum einen waren Schläge vorhanden, auf denen noch Feldfrüchte (z. B. Futterrüben) standen, die folglich eine Betrachtung des Bodens verhinderten. Diese Flächen spielen für die weitere Betrachtung keine Rolle und werden durch den Vegetationsindex später maskiert (Abb. A-3). Bei einigen, schon abgeernteten Schlägen, lagen noch die Ernterückstände obenauf, oder es hatten schon die neuen Feldfrüchte ausgetrieben (z. B. Wintergerste, Raps). Diese Flächen werden im weiteren Verlauf der

Bearbeitung ebenfalls aus der Untersuchung herausgenommen, damit das Ergebnis nicht durch die spektralen Eigenschaften der Vegetation oder deren Ernterückstände beeinflusst wird (Kap.: 6.2). In die weitere Analyse werden nur die Flächen einbezogen, die aufgrund des Vegetationsindex und der Fotos unbedeckten Boden aufweisen.

Bei diesen Flächen ist weiterhin von unterschiedlichen Bodenbearbeitungsständen auszugehen, die sich in einer unterschiedlichen Rauigkeit der Oberfläche widerspiegeln, und dadurch auch das Reflexionssignal der Oberfläche modifizieren (Kap.: 5.4.4). Anhand des verwendeten Fotodokumentationsmaterials ist es nicht möglich, auf unterschiedliche Bearbeitungszustände der Bodenoberfläche (Pflügen, Eggen usw.) zu schließen. Dergleichen Informationen über die Testschläge lassen sich nicht auf andere Schläge übertragen. Bei allen Ergebnissen und Interpretationen muß dieser Umstand immer bedacht und kritisch betrachtet werden. Des weiteren bleibt es fraglich, ob das Foto wirklich noch den Bearbeitungszustand der Satellitenaufnahmen, die erst sechs Tage später erfolgten, darstellte.

3.2 Ground Truth Daten

Unter *Ground Truth* Daten werden sämtliche Informationen zusammengefaßt, die über den Untersuchungsraum und die Testgebiete vorliegen. Für die Lesbarkeit und Interpretation von Fernerkundungsdaten, sowie für die Verifikation von Klassifizierungsergebnissen ist eine umfangreiche Datengrundlage von sehr hoher Relevanz. Die Informationen werden in der Regel aus vorhandenem topografischem, geologischem und sonstigem Kartenmaterial, sowie Geländebegehungen, -proben und -messungen gewonnen. Ground truth Daten können in analoger und digitaler Form Anwendung finden, wobei für die Arbeit mit einem *Geografischen Informationssystem* (GIS) digitale Daten notwendig sind. In den verschiedenen, auf dem Markt erhältlichen, GIS-Softwarepaketen können die Informationen aus unterschiedlichen Bereichen durch das Übereinanderlegen von verschiedenen Layern (Ebenen) in einem Bildprodukt betrachtet und verglichen werden, was die Interpretation vereinfacht. In den nachfolgenden Punkten ist die Ground truth aufgeführt, die in dieser Arbeit verwendet wird.

3.2.1 Geologische Karten

Für die Analyse der geologischen Ausgangssituation werden die Informationen der analogen geologischen Karte im Maßstab 1:100000 und die Karte der Bodenregionen/Bodenlandschaften Thüringens im Maßstab 1:500000 (SEIDEL 1995) ausgewertet.

3.2.2 Topografische Karten

Der ausgewählte Untersuchungsraum befindet sich auf drei verschiedenen topografischen Kartenblättern des Maßstabs 1:25000. Die benötigten Meßtischblätter 49 33, 49 34 und 4834 liegen in analoger Form vor. Für die Paßpunktsuche (*Kap.: 7.2*) zur Geokodierung der Reichsbodenschätzungskarten werden außerdem topografische Kartenblätter im Maßstab 1:10000 (Ausgabe 1992, Stand 1987) herangezogen. Zur Beschreibung des Reliefs wird zusätzlich die Hangneigungskarte im Maßstab 1:10000 genutzt, die bei der TLL in analoger Form im Kartenarchiv vorliegt.

3.2.3 Reichsbodenschätzung (RBS)

Mit dem Ziel der gerechteren Besteuerung der Landwirtschaft wurde 1934 das Reichsbodenschätzungsgesetz erlassen, welches nebenbei auch die Bestandsaufnahme der Böden als allgemeine Planungsgrundlage realisierte. Es sollte jeder Boden eine genaue Kennzeichnung seiner Beschaffenheit nach bodenkundlichen Kriterien, und eine Bewertung der Ertragsfähigkeit nach einer Reinertragsverhältniszahl erhalten (FREUND 1992). Die Reichsbodenschätzung erfaßt die maximale, potentielle Standortertragsfähigkeit unter optimalen Randbedingungen (KUNTZE ET. AL 1994). Die dazu notwendigen Arbeiten wurden von der Finanzverwaltung durchgeführt, in deren Finanzämtern auch heute noch größtenteils das Kartenmaterial archiviert ist.

Die Klassenflächen wurden nach Anleitung durch die Erfassungsanweisung aufgenommen. Mit Hilfe von Bohrstockproben wurden in einem 50 m-Raster Bodenproben genommen und zusätzlich in der Mitte einer aus diesen Proben für gleichartig befundenen Fläche ein Grabloch ausgehoben. Auf Grundlage dieser Grablöcher, deren detaillierten Beschreibungen (Grablochbeschrieben), und den umliegenden Bohrstockproben wurden Flächen gleicher

Eigenschaften ermittelt und festgelegt. Diese Klassenflächen enthalten alle Angaben zum Boden und dessen wirtschaftlichem Ertragspotential (FREUND 1992).

Die Flächen der Acker- und der Grünlandstandorte wurden nach unterschiedlichen Kriterien im Acker- bzw. Grünlandschätzungsrahmen bewertet. In dem Bodenwert des Ackerschätzungsrahmen kommen Bodenart, Entstehungsart und Zustandsstufe der Entwicklung zum Ausdruck. Letztere kennzeichnen ihrerseits wiederum die durch Klima, früheren Pflanzenbewuchs, Geländegestaltung und Wasserhaushalt hervorgerufenen unterschiedlichen Bodeneigenschaften. Aufgrund der drei Kriterien können die Böden insgesamt in 224 Klassen differenziert werden: 8 Bodenarten, 7 Zustandsstufen und 4 Entstehungsarten. Daraus ergibt sich dann das Reinertragsverhältnis (Bodenzahl) für jeden Standort, das sich im Rahmen von 7 (schlechtester Standort) und 100 (bester Standort) bewegt.

Der Grünlandschätzungsrahmen dagegen ging von einer Unterteilung in 225 Klassen aus und verwendete dafür vier verschiedene Merkmale: 5 Bodenarten, 3 Bodenzustandsstufen, 3 Klimastufen und 5 Wasserstufen. Die Bewertung erfolgte mit der Grünlandgrundzahl zwischen 7 und 88 (FREUND 1992).

Die zusätzlich angegebenen Acker- bzw. Grünlandzahlen ergaben sich aus Zu- oder Abschlägen aufgrund von z. B. klimatischen oder reliefbedingten Bevor- oder Benachteiligungen eines jeden Standortes. Ein Faktor, der als Abschlag miteinflöß, ist z. B. die Vernässungsdisposition (Werner 1998, mündlich).

Das entstandene Kartenwerk liegt als Feldschätzungsrohkarte im Maßstab 1:1000 bis 1:5000 vor, und beinhaltet die Klassenflächen mit den Positionen der Bohrstockproben, sowie der Grablöcher mit der dazugehörenden Bodenzahl.

Genauere Beschreibungen der Bodenprofile sind den Grablochbeschrieben zu entnehmen, nach deren Analyse auch die Ermittlung des Bodentyps möglich ist. CORDSEN ET AL. (1992) halten eine Auswertung der Grablochbeschriebe im Rahmen bodenkundlicher Bearbeitungen für unerlässlich, „da nur sie die für eine grundlegende bodenkundliche Standortbeurteilung notwendigen Basisdaten enthalten“. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die

Auswertung der Grablochbeschriebe nicht berücksichtigt, da sie den Zeitrahmen überschritten hätte und eine Bearbeitung der Schätzungskarten im Vordergrund stand.

Probleme hinsichtlich der Handhabung ergeben sich aus der heute unüblichen Klassifikation der Bodenart, die aus dem obersten Meter des Bodenprofils bestimmt wurde, und somit die Substratschichtung unberücksichtigt ließ (KRESSE 1996). Negativ zu bewerten ist auch, daß die Beschreibung der Bodengenese (Zustandsstufe), die in sieben Entwicklungsstufen, von besonders gut bis zu weitgehend verbraucht, erfolgte, nach heutigen wissenschaftlichen Kenntnissen nicht mehr tragbar ist (KRESSE 1996). Die Auswertung der Bodenschätzung wird heute erheblich durch die fehlende Übersetzung der damaligen Begriffe erschwert. BENNE ET. AL (1990) legten einen Übersetzungsschlüssel vor, der sich an der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 4) orientiert, und vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, im Rahmen des Aufbaus vom Niedersächsischen Bodeninformationssystem (NIBIS), verwendet wird. Dieser Schlüssel ist durch langjährige Geländevergleiche und analytische Untersuchungen methodisch abgesichert und erprobt. In einem erstellten Formblatt werden Kürzel und Begriffe der Reichsbodenschätzung erfaßt und in die Bodenhorizonte nach der KA 4 übersetzt.

Bei der Analyse und Interpretation von Fernerkundungsdaten ist immer daran zu denken, daß die abgebildete spektrale Information nur von der Bodenoberfläche resultiert. Die Bodenkarten beziehen sich jedoch nicht nur auf die Oberfläche, sondern beinhalten die Information aus einer breiteren Schicht des Bodenkörpers. Rückschlüsse aus dem Bodenkörper auf die Oberfläche oder umgekehrt sind nicht immer möglich, da die obere Bodenschicht anthropogener Bewirtschaftung unterliegt und durch Düngung und sonstiger Bearbeitung (z. B. Pflügen) eine Veränderung und Durchmischung erfolgen kann.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Arbeit mit den Reichsbodenschätzungskarten ergibt sich bei ihrer exakten geografischen Einpassung. Aufgrund des fehlenden Koordinatenbezugs können für die Georeferenzierung nur die alten Flurstücksgrenzen als Paßpunkte herangezogen werden. Diese stimmen aber nicht immer exakt mit den aktuellen Feldgrenzen überein, so daß teilweise eine interaktive Nachkorrektur am Monitor notwendig ist. Eventuelle geografische Unkorrektheiten in dieser Arbeit sind auf diesen Umstand zurückzuführen. Eine ausführliche Darstellung der Problematik, die bei der Digitalisierung der RBS-Karten existiert, ist in SEYFERT (1996) zu finden.

Die Reichsbodenschätzungskarten des Untersuchungsraums liegen bei den Katasterämtern von Weimar und Apolda vor. Aufgrund der sehr beträchtlichen Kosten für eine Kopie dieser Informationen (eine Flur kostet bis zu 90,- DM) wurde teilweise auf bereits vektorisierte Schlagkarten zurückgegriffen, die im Rahmen einer früheren Diplomarbeit bei der TLL angefertigt worden sind. Neben dem analogen Kartenmaterial der Katasterämter existiert außerdem eine digitale Version im Rasterformat, die bei der Oberfinanzdirektion Thüringen vorliegt. Durch die Mithilfe der TLL war es möglich, die digitalen Karten einiger Schläge für die Verifikation der Klassifizierungsergebnisse zu bekommen und in der Arbeit zu verwerten.

3.2.4 Mittelmaßstäbige Standortkartierung für die Landwirtschaft (MMK)

Die MMK entstand zu Beginn der 70er Jahre unter Verwendung der Ergebnisse der Reichsbodenschätzung. Sie ist eine Generalisierung dieser und liegt für das gesamte Gebiet der ehemaligen DDR in Übersichtskarten im Maßstab von 1:100000 und Arbeitskarten im Maßstab 1:25000, die auf der Basis des Meßtischblattes erstellt wurden, vor. Die MMK wurde unter Verwendung verschiedener Unterlagen erstellt. Hierzu wurden vor allem die existierenden geologischen und topografischen Kartenwerke herangezogen, sowie das Informationspotential der Reichsbodenschätzung ausgewertet (ALTERMANN 1992). Als Grundlage der Erarbeitung diente die von SCHMIDT und DIEMANN (1974) erarbeitete Richtlinie für die MMK, in der nähere Erläuterungen nachzulesen sind, auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen werden kann.

Die Bodenformen wurden im Regelfall zu Kartiereinheiten von 100 ha zusammengefaßt und in das System der natürlichen Standorteinheiten eingeordnet (KRESSE 1996). Wenn sich die jeweiligen Gefüge komplizierter darstellten, wurde bis zu einer Größenordnung >30 ha differenziert. Die vorgenommene, starke Zusammenfassung von Bodenarealen macht eine Identifizierung von kleinräumigen Heterogenitäten der Böden unmöglich (KRESSE 1996). Das Kartenwerk enthält durchaus Informationen zu kleinräumigeren Bodenheterogenitäten, weist diese jedoch maßstabsbedingt nicht flächenhaft aus, sondern gibt diese Erscheinungen über Leitbodenformen, die das Pedotopgefüge dominieren oder zumindest flächenmäßig bestimmen, und deren Begleitbodenformen wieder. Für jede Kartierungseinheit ermittelt man einen Standortregionaltyp, dessen Symbol sich aus Substratflächentyp (SFT), Hydromorphieflächentyp (HFT) und den wichtigsten Bestandteilen des Bodeninventars, des

Reliefs, und des Gefügestils ergibt (SCHMIDT und DIEMANN 1981). Es werden „heterogene (chorische) Standorteinheiten, die vor allem durch ein charakteristisches Mosaik der Substrat-, Bodenwasser- und Hangneignungsverhältnisse bestimmt sind“ dargestellt (LIEBEROTH 1982). Die MMK enthält zusätzlich noch Angaben zu den relativen Bodennutzungseignungen der Standorteinheiten, wie z. B. bestimmte Standardfruchtfolgen und wertende Attribute zur Bearbeitbarkeit.

Die Karten der MMK liegen in analoger Form als Meßtischblatt 1:25000 im Kartenarchiv der TLL vor. Die Testschläge befinden sich auf den Blattschnitten 49 33; 49 34 und 48 34. In digitalisierter Form konnte ich auf eine bei der Jenaoptronik GmbH vorliegende Karte zurückgreifen (vgl. *Abb. A-4*). Der Maßstab der MMK von 1:25000 führt dazu, daß einer Zeichnungsungenauigkeit von 1 mm in der Realität eine Abweichung von 25 m entspricht. Bei Vergleichen der Informationen des Kartenmaterials mit den Satellitenaufnahmen des Landsat-TM oder des IRS-1C muß beachtet werden, daß 1 mm Abweichung auf der Karte einem ganzen Pixel in der Satellitenaufnahme entspricht.

3.2.5 Ergebnisse des Felduntersuchungsprogramms

Im Zeitraum vom 21-24 April 1997 wurde von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) eine Feldbeprobung des Schlates 211 bei Buttstedt im Landkreis Weimarer Land durchgeführt. Damit die Probenergebnisse auch für die Auswertung von Fernerkundungsdaten herangezogen werden können, wurde ein Beprobungsraster von 30 m gewählt. An allen Probenpunkten wurden Bodenproben aus drei verschiedenen Tiefen gezogen, wobei für die Interpretation optischer Satellitenaufnahmen nur die Bodenoberfläche interessant ist. Die Volumenproben für die Erfassung bodenphysikalischer Kennwerte wurden aufgrund des größeren Zeitaufwandes nur in zwei Tiefen und alle 67 m genommen (HOPF 1998).

Die untersuchten Bodenkennwerte richteten sich besonders nach ihrem Einfluß auf das Wachstum und die Vitalität des Pflanzenbestandes. Im Folgenden werden in Kürze die verschiedenen aufgenommenen Bodenparameter, und die grundlegenden Ergebnisse dieser Untersuchung genannt. Die Ergebnisse sind dabei aus der Arbeit von HOPF (1998) entnommen, die sich mit der standörtlichen Heterogenität des Schlates 211 bei Buttstedt auseinandersetzt. Es wurden die folgenden Parameter aufgenommen:

- Kennzeichnung des Profilaufbaus
- Nährstoffgehalt (Gesamtstickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium)
- Calciumcarbonatgehalt
- Gehalt an organischer Substanz
- Bodenphysikalische Eigenschaften (Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen, aktueller Wassergehalt, Luft- und Feldkapazität bei pF 2,5)
- Bodenart (Ton, Schluff, Sand)

Die wichtigsten Ergebnisse des Untersuchungsprogramms lassen sich wie folgt darstellen:

Der nordöstliche Bereich des Schlages zeigt deutlich höhere Sandgehalte und wahrscheinlich eine daraus resultierende höhere Lagerungsdichte mit geringerem Porenvolumen als der Rest des Schlages. Sandige Böden lagern im allgemeinen dichter als andere Bodenarten (SCHEFFER ET AL. 1992). Aus diesen Faktoren erklären sich die anderen, in dem Hangbereich festgestellten, Heterogenitäten der übrigen physikalischen Bodeneigenschaften. Das Areal zeichnet sich unter anderem durch eine geringere Wasserspeicherkapazität und nutzbare Feldkapazität (nFk) aus.

Die chemischen Bodeneinhaltsstoffe weisen in ihren Konzentrationen eine durchweg sehr heterogene Verteilung auf. Das oben erwähnte, nordöstliche Areal zeichnet sich auch bei den meisten Inhaltsstoffen als abzugrenzendes Gebiet ab. Besonders bei Calciumcarbonat-, Magnesium- und Humusgehalt zeigt sich ein Kontrast zu dem umliegenden Gebiet. Die Bodenuntersuchungen zeigten außerdem eine positive Korrelation des Humusgehalts mit dem Gehalt an Tonmineralen und Stickstoff in dem Bodenkörper.

- Die Korrelation zwischen Humusgehalt und Tongehalt ist auf die Bildung von Ton-Humus-Komplexen zurückzuführen, die an der Bildung und Stabilität eines grobporigen Aggregatgefüges beteiligt sind (SCHEFFER ET AL. 1992).
- Der größte Teil des Stickstoffs im Bodenkörper liegt in organisch gebundener Form vor und wird über die Mineralisierung der organischen Substanz ständig nachgeliefert. Je höher der Humusgehalt eines Bodens ist, desto höher ist in der Regel auch sein Stickstoffgehalt (SCHEFFER ET AL. 1992).

Die genauen Probeergebnisse sind den Abbildungen im Anhang K (*Abb. K1-a-f* und *K2-a-g*) zu entnehmen und werden in Kapitel 8.2.2, im Rahmen der Korrelationsanalyse von Reflexionswerten und Bodeneinhaltsstoffen, noch einmal erläutert.

4 Der Untersuchungsraum

4.1 Auswahlkriterien und Lage

Bei der Wahl des Untersuchungsgebietes war zu berücksichtigen, daß es sich im Bereich der Landesgrenzen des Freistaates Thüringen befindet, und die Flächen überwiegend agrarisch genutzt werden, um überhaupt die Möglichkeit der Betrachtung von zum Aufnahmezeitpunkt vegetationslosen Standorten zu haben. Im Hinblick auf die Fragestellung der Arbeit war des weiteren eine ausreichend hohe heterogene Vielfalt an Bodentypen, und ein dichtes Nebeneinander dieser auf engem Raum, von großer Bedeutung. Um die Beeinflussung der elektromagnetischen Strahlung durch reliefbedingte Unterschiede in der Illumination so gering wie möglich zu halten, ist es von Vorteil, ein relativ ebenes Gebiet zu wählen.

Ein heterogener geologischer Untergrund stellt eine Voraussetzung für die Ausbildung verschiedener Bodentypen dar. Die *Karte der Bodenregionen/Bodenlandschaften Thüringens* (SEIDEL 1995) zeigt für den Raum nördlich von Weimar ein enges Nebeneinander verschiedener Ausgangsgesteine des unteren und mittleren Keupers und quartärer Lockergesteine, welches Heterogenitäten in der Ausbildung der Bodentypen vermuten läßt.

Die von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) durchgeführten Bodenuntersuchungen auf Schlag 211, sowie das zahlreiche Fotodokumentationsmaterial von einigen Schlägen, welches bei der Jenaoptronik GmbH vorlag, waren weitere ausschlaggebende Kriterien für die Wahl des Untersuchungsgebietes.

Als Untersuchungsgebiet wurde ein vorwiegend agrarwirtschaftlich genutzter Landschaftsraum nördlich von Weimar gewählt. Die größte Ortschaft in diesem Gebiet ist Buttstedt. Die gesamte Flächengröße des Untersuchungsraums beträgt in etwa 200 km². Im geodätischen Gauß-Krüger Koordinatensystem ist das Gebiet mit den folgenden Koordinaten (Hoch- und Rechtswert) verortet:

NW: $x = 4451,000 \text{ km}$, $y = 5664,000 \text{ km}$

SO: $x = 4463,525 \text{ km}$, $y = 5648,975 \text{ km}$

Das Untersuchungsgebiet liegt auf den Topografischen Kartenblättern 49 33; 49 34 und 4834 der TK 25 vor. Einen Überblick zeigt die Satellitenszene in Abbildung A-1 im Anhang, auf der auch die Testschläge markiert sind.

4.2 Geologischer Überblick

Die Landoberfläche Thüringens ist das Ergebnis tertiärer und quartärer Reliefentwicklung, deren Morphogenese hauptsächlich klimatischen und tektonischen Einflüssen unterlag. Der ausgewählte Untersuchungsraum befindet sich im Randbereich des Thüringer Keuperbeckens, dessen geologische Ausgangsgesteine von den Schichten des unteren und mittleren Keupers bestimmt werden, die ihre Entstehungszeit vor ca. 200 Mio. Jahren hatten. Der mittlere Keuper ist geprägt durch Tonmergellagen, die sich durch Verwitterung zu tonigen Fließerden entwickelten. Er zeichnet sich vor allem durch sehr kalkhaltige Tone aus. Der untere Keuper weist demgegenüber eine weitaus größere Heterogenität auf. Hier wechseln sich Tonmergel- und sandige Schichten ab, wobei die sandigen Bereiche nahezu kalkfrei sein können (WERNER 1998, mündlich). Aufgrund der geringen Widerstandsfähigkeit dieser Gesteinsschichten konnte ein muldenförmiges Großrelief entstehen (SEIDEL 1995). Die muldenförmige Ausbildung des Thüringer Beckens, gegenüber den benachbarten Gebieten, fand durch die jungmesozoische Gebirgsbildung statt.

In Thüringen stellt der elsterglaziale Eisvorstoß den Höhepunkt des Pleistozäns dar. Dieser Vorstoß ging weit über das Thüringer Becken hinaus und hinterließ eigene glaziäre und fluvioglaziale Ablagerungen (SCHRAMM 1995).

Während des Pleistozäns, und hier vor allem innerhalb des Weichsel-Glazials (vor ca. 40000 Jahren), sedimentierten über dem Ausgangsgestein äolische Lössschichten, die in großen Teilen des Gebietes die folgende Bodenentwicklung in starkem Maße beeinflussten. Hierbei handelt es sich um einen Löß, der durch fluviatile Umlagerungsprozesse aus dem „echten Löß“ (durch äolische Sedimentation entstanden) hervorgegangen ist, und welcher sich durch einen Anteil an gröberem Fremdsubstrat, vor allem Sand und Schotter, auszeichnet (RICHTER 1970). Der Löß Thüringens ist aus lokalem geologischen Material entstanden und besitzt aus diesem Grund einen sehr hohen Tonanteil (WERNER 1998, mündlich). Thüringen gehört zu der sogenannten Periglazialzone, in der Frostformungsprozesse an der Oberfläche und in dem

Boden dominierten und es sich die meiste Zeit über nur eine schütterere Tundrenvegetation ausbilden konnte (SCHRAMM 1995).

4.3 Das Relief

Die Geomorphologie des Gebietes besteht vorwiegend aus welligen Plateaubereichen und Flachhängen. Die Reliefenergie ist in diesem Landschaftsraum relativ gering. Für den Schlag 203 (*Kap.: 4.4.2.1*) weist die Hangneigungskarte 1:10000 die Hangneigungsgruppe 1 aus, was 4-9 % Gefälle entspricht (SCHMIDT ET AL 1981). Die markantesten Einschnitte bilden die beiden schmalen Bäche Rohrbach und Scherkonde, die aus östlicher bzw. südöstlicher Richtung nach Butteltstedt verlaufen. Im Bereich der zur Talniederung hin abfallenden Hänge treten stärkere Hangneigungen auf. Der Schlag 211 (*Kap.: 4.4.2.3*), der im Nordosten zum Roßbach hin abfällt weist für diesen Bereich teilweise ein Gefälle von 11-14 % auf.

Die Bedeutung des Reliefs als bodenbildender Faktor liegt vor allem in der Stärke der Hangneigung und der daraus folgenden Modifikation des Ausmaßes und der Richtung der Schwerkrafteinwirkung auf den Boden. Die Schwerkraft bewirkt, daß Wasser stets bergab fließt und so an der Bodenoberfläche und in den Bodenhorizonten wirksam wird (KUNTZE ET AL. 1994). Der Erosionsprozeß wird von der Hanglänge und der Hangneigung bestimmt, wobei die Veränderung der Hangneigung größere Auswirkungen hat (SCHWERTMANN 1988). In Agrarlandschaften sind auf Oberhängen und steilen Hanglagen abgetragene, und damit genetisch verjüngte Böden anzutreffen. Das erodierte Material wird in den Mulden und Tälern als Kolluvium abgelagert. Neben den erosiven Prozessen modifiziert das Relief auch die klimatischen Gegebenheiten in den Tälern und auf der Kuppe oder am Süd- und Nordhang. Je nach Exposition des Hanges herrschen unterschiedliche Temperaturen und Feuchteverhältnisse vor, die ihrerseits wiederum die Bodengenese beeinflussen.

Diese reliefbedingten Prozesse führen zu einer Heterogenität der Bodenlandschaft, die sich auch in den standörtlichen Bodeneigenschaften niederschlägt. Topografische Information kann Aufschlüsse über mögliche Feldheterogenitäten liefern. Verschiedene Forscher (u.a. LEE 1988, SU 1989) haben sich mit der Einbeziehung der topografischen Information in die digitale Klassifizierung multispektraler Fernerkundungsdaten befaßt und dabei Ergebnisse mit einem höheren Genauigkeitsgrad erhalten.

4.4 Der Boden

Nach der Definition versteht man unter Boden die belebte, inhomogene, obere Verwitterungsschicht der Erdrinde, die aus einem Stoffgemisch fester, organischer und mineralischer Teilchen verschiedener Größe und Zusammensetzung, sowie Wasser und Luft besteht (WEVER 1989).

Das rezente Erscheinungsbild der Böden ist das Ergebnis vielfältiger Wirkungsfaktoren im geologisch jüngsten Zeitabschnitt. Insbesondere die letzte Kaltzeit, das Weichsel-Glazial, und der Zeitraum vom Postglazial bis zum Holozän haben die heute vorliegenden Böden geprägt. Im Thüringer Raum dominierte vor allem der Einfluß der Lithosphäre durch den Chemismus der Ausgangsgesteine die Genese der Böden (SEIDEL 1995), wobei unter der Bodenbildung die Gesamtheit der Vorgänge verstanden wird, die an der Erdoberfläche die Verwandlung des Gesteins zu Boden bewirken. Bei der gesamten Pedogenese ist davon auszugehen, daß die gegenwärtigen Horizontkombinationen schon im Spätglazial ausgeprägt waren und die rezente Bodenentwicklung nur noch modifizierenden Charakter hat. Hierbei spielen vor allem klimatogene und phytogene Faktoren eine entscheidende Rolle für die unterschiedliche Ausbildung von Böden auf gleichem geologischen Untergrund.

In Bezug auf die *Karte der Bodenregionen/Bodenandschaften Thüringens* (SEIDEL 1995) ist der Untersuchungsraum der Bodenregion der lößbeeinflussten Becken und der Lößböden zugeordnet. Die dominanten Leitbodenformen des Keuperbeckens werden mit den Schwarzerden und den Rendzinen angegeben, doch bildeten sich, bedingt durch das enge Nebeneinander verschiedener Ausgangsgesteine des unteren und mittleren Keupers (Tonstein, Tonmergel, Dolomit, Gips, Gipsmergel und z.T. Sandstein), sowie quartärer Lockergesteine (Löß und Geschiebemergel), verschiedene Bodentypen aus (SEIDEL 1995). Der Untersuchungsraum befindet sich im Randbereich des Thüringer Beckens und hat als Leitbodenformen die Parabraunerden, Parabraun-Schwarzerden und Rendzinen, zu denen zusätzlich noch die Begleitbodenformen der Braunerde und des Pelosols auftreten.

4.4.1 Die Böden des Untersuchungsgebietes

Das Zusammenwirken verschiedener Bodenbildungsfaktoren, wie Klima, Vegetation, Wasser, Ausgangsgestein, Relief, Fauna, anthropogene Landnutzung und Zeit, führt zur Ausbildung

unterschiedlicher Bodentypen. Unter einem Bodentyp werden Böden zusammengefaßt, bei denen die Prozesse der Pedogenese durch eine bestimmte Faktorenkombination gesteuert werden und sich demzufolge ähnliche Horizontkombinationen ausgebildet haben und gleiche Entwicklungsstände vorliegen (WEVER 1989). Das Kennzeichen eines jeden Bodentyps ist dabei sein Bodenprofil, das durch die Abfolge der Bodenhorizonte gekennzeichnet ist. Die der Bodenklassifizierung zugrundeliegende „Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland“ wurde von dem Arbeitskreis für Bodensystematik der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft erarbeitet und ist in der entsprechenden bodenkundlichen Fachliteratur, u. a. KUNTZE ET AL. (1994) nachzulesen.

Im folgenden Text werden die wichtigsten Böden im Untersuchungsgebiet aufgeführt, wobei der in Deutschland gebräuchlichen Nomenklatur und Beschreibung gefolgt wurde, die aus KUNTZE ET AL. (1994) übernommen wurde. Auf die vielfältigen, zwischen den verschiedenen Bodentypen existierenden Übergänge, Subtypen und Varietäten wird nicht tiefgreifend eingegangen. Die räumliche Verteilung der Standortregionaltypen im Untersuchungsraum ist im Anhang Abbildung A-4 dargestellt.

- Tschernosem

Die Schwarzerden zeichnen sich durch einen mächtigen Ah-Horizont aus. Infolge intensiver Bioturbation wird Ah-Horizontmaterial in den mineralischen Untergrundhorizont (C-Horizont) umgelagert. Der humose Oberboden besteht aus einem porösen Krümelgefüge (Schwammgefüge) mit einem Gesamtporenvolumen von 50 %. Die Schwarzerden sind sehr leistungsfähige Böden, die in allen Bereichen (Wasserhaltevermögen, Kationenaustauschkapazität, C/N-Verhältnis) positive Eigenschaften vorzuweisen haben. Die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Böden sind nicht mehr zu den ursprünglichen Schwarzerden zu zählen, sondern stellen Subtypen dar, die durch fortschreitende Bodenentwicklung ausgebildet wurden. Der Braunerde-Tschernosem (degradiertes Tschernosem) weist klimatogene und phytogene Merkmale auf, die sich in einem hellen (verbraunten) Bv-Horizont zeigen. Die Entstehung des Bv-Horizontes ist die Folge der Silikatverwitterung und Neubildung von sekundären Tonmineralen. Je nach Stärke dieses Bv-Horizontes wird in Braunerde-Tschernosem (< 20 cm) und Tschernosem-Braunerde (> 20 cm) unterschieden. Der Parabraunerde-Tschernosem zeigt eine vertikale Tonverlagerung im Profil. Diese Lessivierung führt zur Ausbildung von Al- und Bt-Horizonten.

- Rendzina

Die Rendzina weist einen oft humosen und skelettreichen, krümeligen A-Horizont über einem festen C-Horizont aus Carbonatgestein auf. Der Carbonatgehalt der Ausgangsgesteine beträgt über 75 %. Der obere Gesteinshorizont ist oft durch Frostsprengung zerteilt, und der A-Horizont ist mit Kalk angereichert. Die im allgemeinen schwach alkalische bis schwach saure Reaktion bietet Bodenorganismen günstige Bedingungen, die für ein gutes, stabiles Wurmlosungsgefüge sorgen. Trotz gelegentlicher Trockenheitsgefährdung zählen diese Böden, aufgrund ihrer günstigen Sorptionskraft für Pflanzennährstoffe, zu den höher eingeschätzten Ackerstandorten. In dem Untersuchungsgebiet findet sich dieser Bodentyp überwiegend über den Kalken des Muschelkalks an. Da die Rendzinen in der Regel am Beginn der Bodenentwicklung stehen, sind sie häufig flachgründig und, insbesondere in Südlagen, sehr trocken. Ihr Auftreten fällt häufig mit Gebieten höherer Erosionsgefährdung zusammen.

- Allochtone Vega (Braunauenboden)

Der Horizontaufbau der Braunauenböden ist aus verlagertem, mehr oder weniger humosen Bodenmaterial (Solummaterial) entstanden. Dieses Bodenmaterial ist durch Niederschlagswasser von den Oberböden der Hanglagen abgespült und in meist breiten Tälern als Kolluvium sedimentiert worden. Pedogenetische Veränderungen an diesem Material sind nicht erkennbar. Je nach der Herkunft des abgelagerten Materials stellen diese Böden gutes bis sehr gutes Ackerland dar, das sich durch eine hohe biologische Aktivität auszeichnet. Nur wenn regelmäßig wiederkehrende Überflutungen immer wieder neues Material ablagern, bleibt das teilweise sehr mächtige Profil der allochtonen Vega erhalten. Ansonsten setzt durch pedogene Prozesse eine autochtone Bodenentwicklung ein.

Nach der MMK und der KA 4 liegen in dem gesamten Untersuchungsraum vorwiegend die folgenden Regional-Standorteinheiten vor:

Tab. 4: Im Untersuchungsraum vorkommende Standortregionaltypen.

Standortregionaltypen nach MMK und KA4	
Lö1a2	Löß-Schwarzerde + Löß-Braunschwarzerde Tschernosem und Braunerde Tschernosem aus Löß (KA4) Ein Boden der welligen Plateaubereiche und Flachhänge mit Löß als Deckschicht über älterem Gestein. Zeichnet sich durch hohe Wasserspeicherfähigkeit und hohes Nährstoffaufnahmevermögen aus
Lö1c1	Löß - und Lößkerf-Griserde Parabraunerde - Tschernosem aus Löß (Griserde)(KA4) Ein Boden der welligen Plateaubereiche und Flachhänge mit Löß als Deckschicht über älterem Gestein. Hat hohes Wasserspeichervermögen und Nährstoffaufnahmevermögen, neigt aufgrund des weniger stabilen Gefüges zur Verschlammung der Oberfläche
V1a1	Lehm - Schwarzerde des Keuper-Hügellandes Tschernosem aus Lehm- und Mergelsubstraten des Keupers (KA4) Boden der welligen Plateaubereiche und flachen Hänge auf Schichten des unteren und mittleren Keupers. Hat hohes Wasserspeicher- und Nährstoffaufnahmevermögen. Bei tonigem Untergrund zeitweise frühjährliche Vernässung
V3a2	Bergton-Rendzina der Muschelkalkhänge und -plateaus Braune Rendzina und typische Rendzina aus tonreichem Schutt des Muschelkalkes (KA4) Boden der welligen Plateaus und flachen Hänge über Schichten des oberen und mittleren Muschelkalkes. Schwere, kalkhaltige Böden mit unausgeglichem Wasserhaushalt und ungünstigem Gefüge. Vernässung und starke Austrocknung im Wechsel
V3a3	Bergton- und Berglehm Rendzina des Triasgebietes Typische Rendzina und verbrauchte Rendzina aus lehmig-tonigem Schutt des Muschelkalkes (KA4) Kommt vorwiegend auf mäßig geneigten Hängen über Schichten des Muschelkalkes vor. Es ist ein flachgründiger, kalkreicher Boden mit einem mäßigen bis geringen Wasserspeichervermögen und starker Austrocknungstendenz
V3a1	Ton-Rendzina des Trias- und Zechstein-Hügellandes Kalkpelosol und Rendzina aus Tonsubstraten des Keupers (KA4) Boden der mäßig bis stark geneigten Hänge des unteren und mittleren Keupers. Trotz des beträchtlichen Wasserspeichervermögens hat er periodisch Wassermangel
Al1a1	Vernässungsfreier Auenton- und Auenschluff mit Kolluvium Brauner Auenboden (allochtone Vega) aus Lehm bis Ton und Kolluvium in Nebentälern (KA4) Boden der ebenen Nebentäler als Deckschicht über älterem Gestein. Hat hohes Wasserspeichervermögen und frühjährliche, kurzzeitige Tendenz zu starker Vernässung. Periodische Vernässung durch hochanstehendes Grundwasser und Staunässe. Hohes Nährstoffpotential und reichlich Kalkreserve
Al3a5	Vernässungsfreier Auenlehm (Auenschluff) Brauner Auenboden (allochtone Vega) aus schluffig lehmigen Holozänsedimenten (KA4) Boden des Talauenbereichs als Deckschicht über der Niederterrasse. Boden mit hohem Kalkgehalt, hohem Wasserspeichervermögen und frühjährlicher Vernässungstendenz
Al3a6	Schwach vernäßter Auenschluff Brauner Auenboden (allochtone Vega) aus Lehm und Kolluvium in Nebentälern (KA4) Boden der ebenen Nebentäler als Deckschicht über älterem Gestein. Hat hohe Wasserspeicherfähigkeit mit besonders frühjährlicher Vernässungstendenz

4.4.2 Beschreibung der vorhandenen kleinräumigen Feldheterogenitäten

Die Ursache der vorkommenden Feldheterogenitäten liegt vor allem in dem unterschiedlichen, anstehenden, geologischen Ausgangsmaterial, das die Bodenentwicklung in Thüringen maßgeblich beeinflusst hat. Das Vorkommen unterschiedlicher Bodentypen auf einem Schlag ist aber insbesondere auf die anthropogene Landwirtschaft und deren besondere Strukturen in der ehemaligen DDR zurückzuführen. Aufgrund der enormen Schlaggröße in Thüringen existieren vielfältige Heterogenitäten innerhalb eines Feldes. Des weiteren tragen ständige erosive Prozesse ihren Teil zu neu entstehenden Bodenheterogenitäten bei. Das Abspülen des humosen Oberbodens an einigen Stellen des Feldes, und die kolluvialen Ablagerungen an einer anderen Stelle führen zu einer räumlichen Heterogenisierung der Bodeneigenschaften auf einem Schlag.

Die analytische Beschreibung der auftretenden kleinräumigen Feldheterogenitäten innerhalb der einzelnen Schläge wird an verschiedenen, später weiter bearbeiteten Testschlägen vorgenommen, für welche die Daten der Reichsbodenschätzung und der MMK zur Verfügung standen, und die durch den Vegetationsindex (*Kap.: 7.4.1*) zum Aufnahmezeitpunkt der Satellitenszene als vegetationslos ausgewiesen wurden. Diese exemplarische Darstellung soll der Verdeutlichung der existierenden, unterschiedlichen Standortgegebenheiten auf einem Schlag dienen, und die teilweise voneinander abweichenden Aussagen der beiden Kartenwerke hervorheben.

Die Beschreibung der Feldheterogenitäten erfolgt aufgrund der Interpretation vorhandener geologischer, topografischer und bodengeografischer Kartenwerke, wobei besonders die großmaßstäbigen Karten von besonderer Bedeutung waren. Die Interpretation der Bodenkarten basiert auf der Literatur von RAU ET AL. 1995. Die Klassifizierungen der RBS sind für die verschiedenen Testgebiete in den jeweiligen Abbildungen im Anhang zu entnehmen.

Der Vergleich der beiden bodengeografischen Kartenwerke, MMK und Reichsbodenschätzung, zeigt eindeutige Unterschiede in der Genauigkeit der dargestellten Bodenheterogenitäten, was zum einen auf den unterschiedlichen Maßstab, und zum anderen auf den unterschiedlichen Erstellungszweck zurückzuführen ist. Bei der nachfolgenden

Beschreibung und Interpretation der beiden Kartenwerke zeigt sich, daß es teilweise nicht möglich ist, anhand der Karten eine umfassende Darstellung der Bodenunterschiede zu geben. Die Informationen beziehen sich größtenteils auf den Bodenwasserhaushalt, dessen Heterogenitäten in der folgenden Analyse der einzelnen Schläge dargestellt werden. Insbesondere im Hinblick auf die Lesbarkeit und Interpretation von Fernerkundungsaufnahmen sind die Informationen der Bodenkarten jedoch kaum ausreichend. Aussagen über reflexionswirksame Bodeneigenschaften und Bodeneigenschaften sind aus der RBS und der MMK nur in geringem Maße zu entnehmen.

Untersuchungen von REICHE ET AL. 1992 zur Aussagegenauigkeit der RBS-Daten anhand von Ergebnissen einer aktuell durchgeführten Bodenkartierung haben ergeben, daß es „im allgemeinen eine recht gute Übereinstimmung in der Aussage zur Bodenart aus den RBS-Daten im Vergleich zur aktuellen Kartierung“ gibt.

4.4.2.1 Testschlag 203 bei Rohrbach

Der Schlag 203 ist ca. 72,5 ha groß und grenzt nördlich an das Dorf Rohrbach an. Das Relief fällt gleichmäßig von Norden nach Süden ab und erreicht teilweise eine Hangneigung von 4-9 % (nach Hangneigungskarte, nach HOPF). Der MMK zufolge liegt dieser Schlag vollständig in einem Löß-Schwarzerdegebiet (Lö1a2) und weist keine Heterogenitäten auf (*Abb.: A-4*). Betrachtet man für diesen Schlag die Reichsbodenschätzung (Gemarkung Rohrbach, Flur 3 und 4), so sind innerhalb der Schlaggrenzen sehr wohl kleinräumige Bodenheterogenitäten zu erkennen (*Abb. B-1-4*). Neben den beherrschenden Lößböden (Lö) zieht sich in der Mitte des Schlages ein breites Band der Klasse Löß-Verwitterungsboden (LöV) von Ost nach West über das Feld. Diese Klassenbezeichnung deutet auf eine geringere Lößdecke und dicht anstehendes geologisches Ausgangsgestein, in diesem Fall des unteren und mittleren Keupers, hin. Diese Keuperschichten zeichnen sich in der Regel durch einen hohen Carbonatgehalt aus. Die Heterogenität des Bodens spiegelt sich auch in dem sehr differenzierten Bild der Zustandsstufen (von 1-5) und den vergebenen Ackerzahlen von 50-96 wieder.

Pflanzenbaurelevante Unterschiede der Flächen zeigen sich z. B. im Wasserhaushalt. Das Wasserspeichervermögen der mächtigen Lößdeckschichten der Lö-Bereiche ist hoch, und der Wasserhaushalt in der Regel ausgeglichen. Der LöV-Bereich hat eine Lößdecke geringerer Mächtigkeit und neigt teilweise zu Staunässeerscheinungen.

4.4.2.2 Testschlag 205 bei Rohrbach

Die Fläche des Schlates 205 befindet sich auf einer süd-südwest exponierten Hanglage mit einem geringen Gefälle, wobei die Reliefenergie zur südwestlichen Spitze des Schlates hin zunimmt. Der Standort mit einer Fläche von ca. 60 ha liegt vollständig im Gebiet der Löß-Schwarzerden (Lö1a2) (*Abb.: A-4*). In der MMK werden keine kleinräumigen Differenzierungen ausgewiesen. Die RBS (Gemarkung Rohrbach, Flur 4) hingegen zeigt eine Differenzierung im geologischen Ausgangssubstrat (*Abb. C-1-4*). Ein Großteil der Fläche wird den Löß-Verwitterungsböden zugeordnet, was auch hier auf eine weniger mächtige Lößdecke und dicht anstehendes Ausgangssubstrat hindeutet. Diese Unterschiede können sich in der Produktivität der Teilflächen durch einen unterschiedlichen Wasserhaushalt (*Kap.: 4.4.2.2*) auswirken.

4.4.2.3 Testschlag 211 bei Buttelstedt

Die Schlaggröße des Schlates 211 beträgt 23 ha. Dieser Schlag ist auf einem Plateau gelegen und fällt in nordöstlicher Richtung stark ab. Das Gefälle erreicht in dieser Hanglage Werte bis zu 11-14 % (HOPF 1998). Die MMK weist für diesen Schlag drei verschiedene Standortregionaltypen aus:

Die größte Fläche nimmt dabei die ertragreiche Löß-Schwarzerde (Lö1a2) ein. Entlang der südwestlichen Grenze verläuft ein Streifen der Berglehm-Rendzina (V3a3), an die sich an der äußersten Südspitze ein kleiner Bereich mit Lehm-Schwarzerde (V1a1) anschließt (*Abb.: A-4*).

Die RBS (Gemarkung Daasdorf b. B., Flur 2) unterteilt den Schlag in zwei Bereiche unterschiedlichen, geologischen Ausgangsmaterials, den Löß- und den Verwitterungsboden. Als vorherrschende Bodenart liegt der Lehm vor, der nur im Nordwesten von Lehm-Ton abgelöst wird. Die Bereiche der unterschiedlichen, geologischen Ausgangssubstrate stimmen mit den Angaben der MMK relativ genau überein. In der RBS werden aber im Bereich des Lößbodens sehr heterogene Strukturen hinsichtlich der Ertragsfähigkeit ausgewiesen. Die Bodenwerte liegen in einem breiten Dynamikbereich von 36-86 (*Abb. J-3-4*).

Innerhalb des Schlates 211 herrschen aufgrund der verschiedenen Bodenformen teilweise beträchtliche Unterschiede im Bodenwasserhaushalt vor. In den Lößbereichen ist von einem

ausgeglichenen Wasserhaushalt mit hoher Wasserspeicherfähigkeit auszugehen. Trotz eines ebenfalls ausgeglichenen Wasserhaushalts der Lehm-Schwarzerden treten in diesen Bereichen, aufgrund des tonigen Untergrundes, frühjährliche Vernässungserscheinungen auf. Die flachgründigen Böden der Berglehm-Rendzina haben ein geringes Wasserspeichervermögen und neigen zu verstärkter Austrocknung.

4.4.2.4 Testschlag 304 bei Rohrbach

Das Relief des Schlates 304 wird durch einen Plateaurücken dominiert, der allerdings nur eine gering erhöhte Lage aufweist. Er zieht sich von Osten her in den Schlag hinein und entlang seiner Hänge fällt das Gelände mit einer Hangneigung von bis zu 5 % ab.

In der MMK (*Abb. A-4*) liegt die gesamte Schlagfläche (ca. 50 ha) in dem Standortregionaltyp der Löß-Schwarzerden (Lö1a2). Die RBS (Gemarkung Sachsenhausen, Flur 4) zeigt in ihrer Klasseneinteilung ein weitaus heterogeneres Bild des Bodenkörpers (*Abb. D-1-4*). Sie weist ebenfalls einen Großteil des Schlates als Lößstandort aus. Daneben existieren aber auch Löß-Verwitterungs- und reine Verwitterungsstandorte. Der Verwitterungsboden zieht sich in einem schmalen Band von Ost nach West in den Schlag hinein und wird im Norden von schmalen Arealen der Löß-Verwitterungsböden begrenzt. Der Verwitterungsboden ist höchstwahrscheinlich den Lehm-Schwarzerden (V1a1) zuzuordnen, die die ausgewiesenen Bodenklassen der RBS umfassen. Diese Aussage ist nicht anhand der Informationen der MMK zu überprüfen. Die nordwestliche Ecke des Gebietes wird als Löß-Verwitterungsboden ausgewiesen. An diesem Schlag wird sehr gut deutlich, daß sich die Aussagen der MMK und RBS beträchtlich unterscheiden können.

Der Großteil des Schlates (Lö1a2) hat einen ausgeglichenen Wasserhaushalt mit hohem Speichervermögen. Das Band der Lehm-Schwarzerde über tonigem Untergrund zeichnet sich durch frühjährliche Vernässung aus. In den Teilgebieten, für die in der Karte LöV ausgewiesen ist, ist durch die geringmächtige Lößschicht über den Keuperschichten mit einer Neigung zur Staunässe zu rechnen.

4.4.2.5 Testschlag 414 bei Wohlsborn

Dieser südlich von Wohlsborn liegende Testschlag (ca. 45 ha) zeichnet sich durch ein homogen, flachabfallendes Relief aus und ist nach Norden hin exponiert. Er wird von zwei

Standortregionaltypen der MMK beherrscht. Der nördliche Bereich liegt in einem Band aus Bergton-Berglehm-Rendzina (V3a3), während der südliche Teil des Schlages im Bereich der Parabraun-Schwarzerden aus Löß (Lö1c1) liegt (*Abb.: A-4*).

Diese Zweiteilung wird auch in der Klassifizierung der Reichsbodenschätzung (Gemarkung Wohlsborn, Flur 5 und 6) deutlich (*Abb. E-1-7*). Dort wird die südliche Spitze als Löß ausgewiesen, und das restliche Gebiet als Verwitterungsböden deklariert. Innerhalb der Verwitterungsböden kommen zudem einige kleinflächige Areale vor, die der Entstehungsart Löß-Verwitterungsboden zugeordnet werden. Als bestimmende Bodenart liegt der Lehm vor, der den gesamten Bereich der Berglehm-Rendzina beherrscht. Lediglich die lößdominierte Fläche zeichnet sich durch sandigen Lehm in der Kornfraktion ab. Dieser Sandanteil entspricht laut RAU (1995) jedoch nicht dem Standortregionaltyp Lö1c1.

Für den Wasserhaushalt ergibt sich aus dieser Heterogenität des Bodens ein differenziertes Bild. Die Areale der Berglehm-Rendzina sind geprägt durch ein geringes Wasserspeichervermögen mit verstärkter Austrocknungstendenz. Der Lößbereich im Süden hat im allgemeinen eine hohe Wasserspeicherfähigkeit, die jedoch durch den überwiegenden Sandanteil im Dreikorngefüge etwas verringert wird.

4.4.2.6 Testschlag 704 bei Daasdorf

Auch dieser Schlag weist innerhalb seiner Fläche von ca. 50 ha nur geringe Höhenunterschiede auf. Das Relief wird durch einen schmalen Plateaurücken dominiert, der zu der Ausbildung von zwei verschiedenen Expositionen führt. Der nördliche Teil weist eine nach Nordosten geneigte Hanglage auf, wogegen der südöstliche Bereich nach Osten hin abfällt.

In der MMK wird der Schlag 704 zum Großteil als Löß-Schwarzerde (Lö1a2) ausgewiesen (*Abb. A-4*). In der nordwestlichen Ecke der Fläche befindet sich zudem noch eine schmale Linse der Ton-Rendzina aus Keupersubstraten (V3a1). In der Differenzierung der Fläche nach dem geologischen Ausgangssubstrat stimmen die Aussagen der RBS (Gemarkung Heichelheim Flur 4) mit denen der MMK nahezu überein, wobei die RBS den Lößbereich noch weiter in Löß-Verwitterungsböden klassifiziert (*Abb. F1-5*). Diese Bodenklassen befinden sich vorwiegend an der östlichen Schlaggrenze. Ihr Vorkommen steht dabei in

keinem Zusammenhang mit dem vorherrschenden Relief. Die dominierende Bodenart wird durch den Lehm gestellt. Nur in dem Gebiet der Ton-Rendzina ist schwerer Lehm (LT) anzutreffen.

In dem Großteil des Schlages liegt ein günstiger, ausgeglichener Wasserhaushalt vor, wohingegen im Gebiet der Ton-Rendzina ein sehr unausgeglichener Wasserhaushalt mit periodischem Wassermangel vorzufinden ist. Die Eigenschaften des Bodens schwanken mit der relativen Oberflächennähe des anstehenden Tongesteins.

4.4.2.7 Testschlag 706 bei Daasdorf

Der in der Arbeit als 706 bezeichnete Schlag ist im Grunde genommen nur ein Teilbereich des gesamten Schlages 706 (ca. 45 ha). Er ist auf der gesamten Fläche flach nach Osten hin abfallend. Zum südlichen Rand des Schlages hin steigt das Gefälle stark an, und die Exposition verändert sich in südliche Richtung.

Der Großteil der Fläche liegt in dem Standortregionaltyp Löß-Schwarzerde (Lö1a2), der im Norden des Schlages durch ein Band der Lehm-Schwarzerden (V1a1) abgelöst, und im Süden durch ein Gebiet aus schwach vernäßigem Auenschluff (A13a6) begrenzt wird (*Abb.:A-4*).

In der RBS ist der zentrale Bereich des Schlages ebenfalls als Löß ausgewiesen und weist kaum Heterogenitäten in den Bodenwerten auf (*Abb. G1-5*). Im südlichen Hangbereich treten Verwitterungsbodenklassen auf. Der nördliche Bereich, der den Lehm-Schwarzerden zugeordnet wird, weist ein heterogenes Mosaik aus verschiedenen geologischen Ausgangssubstraten auf, die, laut RAU 1995 (S. 24), nicht der Klassifizierung nach der MMK entsprechen. Der östliche Bereich wird von Verwitterungsböden dominiert, wogegen der westliche Teil aus alluvialen und dilluvialen Substraten besteht.

Die uneinheitliche Klassifizierung der beiden Bodenkarten erschwert die Auswertung hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes der Teilgebiete. Die Löß-Schwarzerden haben einen ausgeglichenen Wasserhaushalt. Der Auenschluff-Standort zeichnet sich ebenfalls durch ein hohes Wasserspeichervermögen aus, hat aber eine verstärkte Vernässungstendenz. Hinsichtlich des V1a1-Bereichs ist eine Aussage über den Wasserhaushalt schwer zu realisieren, da die RBS eine andere Klassifizierung zeigt. Ein V1a1-Standort hat im

allgemeinen ebenfalls einen ausgeglichenen Wasserhaushalt. Der Boden neigt jedoch besonders im Frühjahr zur Vernässung.

4.4.2.8 Testschlag 809 bei Buttelstedt

Der Schlag 809 ist ca. 52 ha groß und weist ein relativ ebenes, kaum strukturiertes Relief auf. Die MMK zeigt für diesen Schlag hauptsächlich die Standortregionaltypen V1a1 (Lehm-Schwarzerde) im östlichen Bereich und V3a1 (Ton-Rendzina) im nordwestlichen Teil. Diese beiden Bodentypen werden durch einen schmalen Streifen von Auenschluff (Al3a6) in der Mitte des Feldes getrennt (*Abb. A-4*).

Die beiden Hauptareale unterscheiden sich beträchtlich in ihrer Ertragsfähigkeit. Während die Standorteigenschaften des V1a1 mit einem meist sehr guten Krümelgefüge, einem hohen Nährstoffpotential und einer hohen Wasserspeicherfähigkeit sehr gut sind, besteht bei dem V3a1 aufgrund seiner Mittel- bis Flachgründigkeit und des daraus resultierenden, mäßigen Wasserspeichervermögens eine erhöhte Austrocknungsgefahr und eine geringere Ertragsfähigkeit. Die Eigenschaften des Bodens im V3a1-Areal schwanken dabei mit der relativen Oberflächennähe des anstehenden Tongesteins. Für die V1a1-Gebiete über tonigem Untergrund ist mit frühjährlicher Vernässung zu rechnen.

Die von der Reichsbodenschätzung (Gemarkung Buttelstedt, Flur 4 und 5) als vorherrschend ausgewiesene Bodenart ist der Lehm, dessen Verbreitung sich weitgehend mit den in die MMK als Lehm-Schwarzerde klassifizierten Flächen deckt. Eine sehr heterogene Verteilung der geologischen Ausgangssubstrate zeigt der nordwestliche Bereich, in dem Verwitterungsböden und eine Mischform aus Dilluvial- und Verwitterungsboden anzutreffen sind (*Abb. H1-5*).

4.5 Klimatische Verhältnisse

Der Untersuchungsraum befindet sich in einem Übergangsbereich zwischen dem westlich gelegenen, maritim geprägten Küstenklima und dem kontinentalen Binnenklima. Das Klima zeichnet sich durch wärmere und trockenere Sommer und kältere Winter mit einer großen jährlichen Temperaturdifferenz aus. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei ca. 8,2 °C und die Gesamtniederschlagsmenge im Jahr bei 554 mm (TLL Jena 1997).

4.6 Anthropogene Landnutzung

Der gewählte Untersuchungsraum unterliegt einer sehr monotonen Nutzungsstruktur. Die dominierende ackerwirtschaftliche Landnutzung drängt die als Grünland und Forst genutzten Flächen auf vereinzelte, wenige Hektar große Areale zurück. Die landwirtschaftliche Struktur ist durch die agrargenossenschaftliche Landwirtschaft der ehemaligen DDR geprägt. Die Feldschläge zeichnen sich durch überwiegend große Nutzflächen aus. Die Agrarlandschaft ist von Feldgehölzen und Hecken leergeräumt. Die Siedlungsbereiche innerhalb des Untersuchungsraums haben dörflichen bis kleinstädtischen Charakter mit einer aufgelockerten Bebauungsstruktur.

5 Grundlagen der Fernerkundung

Der Begriff Fernerkundung ist die Übersetzung des amerikanischen Begriffes „Remote sensing“ und bedeutet: „Erfassen oder Aufnehmen von Objekten aus der Entfernung, ohne direkten Kontakt des Aufnahmesystems, des sog. Sensors, mit dem zu erkundenen Objekt“ (KRONBERG 1985). Die Fernerkundung bedient sich der reflektierten oder emittierten elektromagnetischen Strahlung der Objekte an der Erdoberfläche und bildet diese Informationen ab.

5.1 Beginn und Entwicklung der Fernerkundung

Die Anfänge der Bodenfernerkundung sind in den 30 er Jahren dieses Jahrhunderts zu suchen. Die Verwendung von Luftbildern, zuerst als topografische Grundlage für thematische Kartierungen und später auch für direkte Bodentypeninterpretationen, fand Einzug in die wissenschaftliche Arbeit von Forschern und Bodenkundlern.

In den 60er Jahren fand eine strukturelle Wandlung der Bodenkartografie statt, die der Fernerkundung und deren technischer Entwicklung neue Impulse verlieh (KOROLYUK ET AL. 1994). Das Objekt dieser neuen Herangehensweise der Bodenkartografie war nicht mehr die Verteilung eindeutig zu klassifizierender Bodentypen, sondern vielmehr die geografische, räumliche Heterogenität und Struktur der Böden. Kartiereinheiten waren nicht mehr durch dominante Böden charakterisiert, sondern die Kombination ihrer Eigenschaften, ihrer Entwicklung und dem relativen Anteil ihrer Bestandteile an der Bodenoberfläche fand mehr Interesse. Die theoretischen Grundlagen dieser Herangehensweise wurden unter anderem in den Arbeiten von HAASE (1978) und HAASE und SCHMIDT (1970, 1975) formuliert (nach KOROLYUK ET AL. 1994) und insbesondere von russischen Bodenkundlern vertieft. Für die Aufnahme der Eigenschaften und Strukturen an der Bodenoberfläche stellte die Fernerkundung eine vielversprechende Methodik dar, die fortan immer neue technische Weiterentwicklung erfuhr.

Mit der Entwicklung der satellitengestützten Aufnahmesysteme wurde die Fernerkundung von Bodenoberflächen besonders für mittlere und kleine Maßstäbe sehr interessant. Mit dem 1972 von den Amerikanern gestarteten Erderkundungssatelliten Landsat-1 MSS (*Kap.:* 5.3.2)

standen erstmals digitale Fernerkundungsdaten für die zivile Nutzung zur Verfügung. Die heutige Entwicklung der Sensoren geht hin zu besseren räumlichen Auflösungen sowie zu Stereobildaufnahmen (SPOT, MOMS) und eröffnet dadurch immer weitere Anwendungspotentiale. Die räumliche Auflösung der Aufnahmen ist in der Regel das restriktive Element bei den verschiedenen umweltbezogenen Anwendungsmöglichkeiten.

5.2 Physikalische Grundlagen der Fernerkundung

In dieser Arbeit soll nur ein kurzen Überblick über die komplexen Strahlungs-, Reflexions- und Absorptionsvorgänge, die für die Fernerkundung von Bedeutung sind, dargestellt werden. Für vertiefende Informationen wird auf die einschlägige Literatur von z. B. REES (1990) oder SCHANDA (1986), KRONBERG (1985) verwiesen.

5.2.1 Elektromagnetische Strahlung

Die optische Fernerkundung bedient sich der elektromagnetischen Strahlung, die von der Sonne ausgestrahlt und durch Reflexion an der Bodenoberfläche wieder zurückgestrahlt wird, so daß sie von dem Scanner im Orbit aufgenommen werden kann. Die spektrale Zusammensetzung der Sonnenstrahlung entspricht dabei in etwa der eines Schwarzkörpers bei 5900 K (*Planksches Strahlungsgesetz*) und reicht vom kurzwelligen Ultraviolett, über das sichtbare Licht, bis zu etwa 5 μm Wellenlänge im infraroten Bereich. Das Strahlungsmaxima liegt dabei bei ca. 0,5 μm (KAPPAS 1993).

Beim Durchgang durch die Atmosphäre erfährt die Strahlung durch Absorptions- und Streuprozesse eine Änderung in ihrer Intensität und in ihrer spektralen Zusammensetzung. Die Prozesse der Absorption und der Streuung, die beide zu einer Schwächung der Strahlung führen, werden unter dem Begriff Extinktion zusammengefaßt (ALBERTZ 1991). Die Extinktion ist bei ansonsten gleichen Bedingungen in ihrer Stärke wellenlängenabhängig (HILDEBRANDT 1996). Einige in der Atmosphäre vorherrschende Gase, wie Ozon, Methan, Kohlenstoff und Wasserstoff haben die Fähigkeit, elektromagnetische Strahlung spezifischer Wellenlängenbereiche (*Absorptionsbanden*) zu absorbieren. Es existieren daher bestimmte Bereiche im elektromagnetischen Spektrum, die für die Fernerkundung nicht genutzt werden können. Abbildung 2 zeigt das elektromagnetische Spektrum mit den vorhandenen Absorptionsbanden.

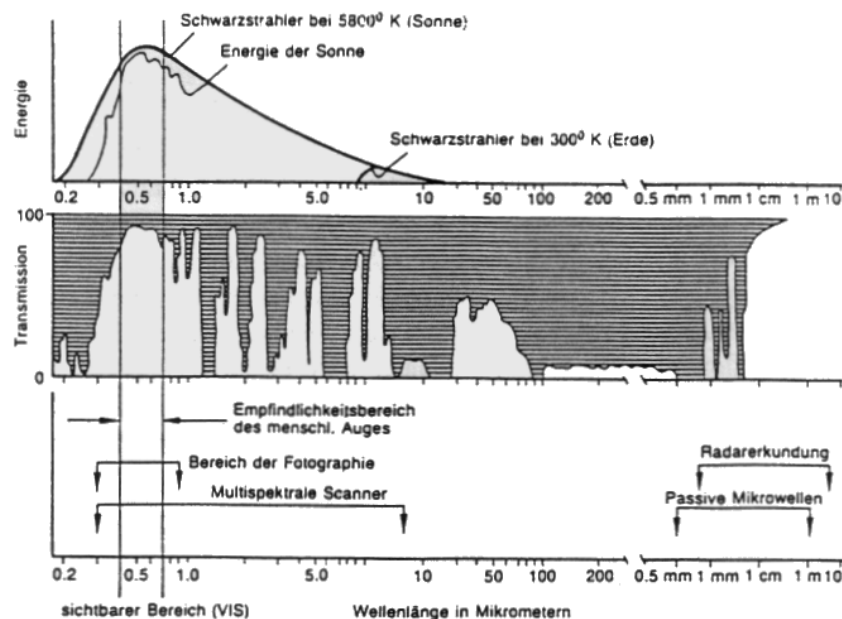


Abb. 2: Das elektromagnetische Spektrum (nach KAPPAS 1993).

Für die Fernerkundung sind derzeit folgende Spektralbereiche von Bedeutung: Der ultraviolette Bereich von 0.27-0.4 µm, der visuelle Bereich (VIS) von 0.4-0.78 µm, nahes und fotografisches Infrarot (NIR) im Bereich von 0.7-0.9 µm, mittleres Infrarot (MIR) von 1-3 µm, thermales Infrarot in den Bereichen von 3.5-5 µm und 8-14 µm, sowie der Mikrowellenbereich, der von 0.3 cm bis 10 cm reicht (KRONBERG 1985).

Durch die geschickte Wahl der Aufnahmekanäle innerhalb der atmosphärischen Fenster wird die Absorption durch die verschiedenen Gase minimiert. Die Beeinflussung der Satellitenszene geht vielmehr von den Streu- und Absorptionseigenschaften der in der Atmosphäre vorhandenen Aerosole aus (KAUFMANN 1989 in ASRAR 1989). Dieser Schwächung steht der Zugang von in der Atmosphäre gestreuter Strahlung gegenüber. Die Zustrahlung überwiegt in der Regel und unterscheidet sich in ihrer spektralen Zusammensetzung von der reflektierten Strahlung der Objekte. Eine solche Überlagerung ist im allgemeinen, vor allem im VIS, kontrastmindernd und verfälscht die Objektsignatur (HILDEBRANDT 1996). Die am Scanner ankommende Strahlung entspricht somit nicht mehr der von den Objekten ausgesendeten Strahlung. Diese Kontrastminderung ist abhängig von der Trübung der Atmosphäre und tritt bei kurzwelliger Strahlung viel stärker auf als bei

langwelliger Strahlung. Auch verschiedene Objektreflexionseigenschaften können die Intensität der Kontrastminderung beeinflussen. So ist zu beobachten, daß sie sich bei Objekten mit geringer Albedo stärker auswirkt als sie es bei stark reflektierenden Objekten tut (HILDEBRANDT 1996).

Eine weitere Größe, welche die Fernerkundung auf gravierende Weise beeinflußt, ist die Bewölkung. Für alle optischen Aufnahmesysteme ist ein nahezu wolkenfreier Himmel eine grundlegende Voraussetzung. Sie sind von der elektromagnetischen Strahlung abhängig, die nicht durch die Wolkendecke gelangen kann. Da spektrale Unterschiede von Objekten häufig nur in Nuancen bestehen, kann eine Veränderung der Reflexionsstrahlungszusammensetzung durch die atmosphärischen Einflüsse zu Fehlinterpretationen führen. Eine Korrektur, die so genannte *Atmosphärenkorrektur* (Kap.: 7.3.2), dieser Einwirkungen scheint für quantitative Zielsetzungen notwendig.

5.2.2 Vorgänge an der Erdoberfläche

Beim Auftreffen der elektromagnetischen Strahlung auf die Erdoberfläche, kommt es an dieser zu verschiedenen Wechselwirkungen. Ein Teil der Strahlung kann von der Materie, je nach Oberflächenbeschaffenheit, direkt gerichtet oder diffus reflektiert werden. Ein anderer Teil dringt in die Materie ein und wird an den Grenzflächen zu anderer Materie gebrochen und reflektiert. Beide Vorgänge werden unter dem Begriff Reflexion zusammengefaßt.

Reflexion ist definiert als das Zurückwerfen elektromagnetischer Strahlung an einer Fläche, ohne daß eine Änderung der Frequenz der monochromatischen Strahlungsanteile erfolgt (KASTEN ET AL. 1972). Es wird zwischen den zwei Arten der diffusen und der gerichteten Reflexion unterschieden. Nach den Gesetzen der optischen Spiegelung versteht sich die gerichtete Reflexion als Reflexion ohne Streuung, und bei der diffusen Reflexion ist der Strahlungsfluß in alle Richtungen gleich. Die gleichförmige (diffuse) Reflexion entspricht der Definition einer *Lambertschen Fläche* (ALBERTZ 1991). Die Reflexion natürlicher Oberflächen läßt sich nicht als diffuse Reflexion bezeichnen, da sie in der Regel einen mehr oder weniger gerichteten Anteil aufweist.

Neben der Reflexion gibt es auch die Absorption, bei der ein Anteil der Strahlung von der Materie absorbiert wird und zur Erwärmung dieser, mit anschließender Emission von

Wärmestrahlung führt (*Kirchhoffsches Strahlungsgesetz*), sowie die Transmission, wenn ein Körper für die auftreffende Strahlung durchlässig ist.

Für die Fernerkundung und die Nutzungsmöglichkeit der Objektlokalisierung ist es von Bedeutung, daß die genannten Wechselwirkungen wellenlängen- und materialabhängig sind (KRONBERG 1985). Die an der Erdoberfläche vorhandenen Materialien wie Wasser, Vegetation, Gestein und Boden haben ihre spezifischen, materialbezogenen Spektralverhalten mit den jeweils charakteristischen Spektren der Reflexion, Absorption, Emission und Transmission.

Die spektrale Signatur eines Objektes gibt die Intensitätswerte seiner Reflexion und Emission wieder, die von einem Sensor in unterschiedlichen Grauwerten abgebildet werden. Sie stellt ein Erkennungsmerkmal des Objektes dar und ist die Grundlage für die digitale Auswertung und Klassifizierung von Fernerkundungsdaten. Die Reflexionseigenschaften des Bodens werden von verschiedenen Parametern beeinflusst und werden in *Kapitel 6* bearbeitet.

5.3 Verschiedene Aufnahmesysteme und deren Aufnahmeprinzipien

Die Fernerkundung der Erde wird von zwei verschiedenen Arten von „Aufnahmeplattformen“ aus vorgenommen. Die Aufnahmesensoren werden entweder auf Flugzeugen oder auf Satelliten installiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden nur die satellitengestützten Systeme bearbeitet und beschrieben.

In der satellitengestützten Fernerkundung gibt es zwei grundlegend unterschiedliche Aufnahmesysteme. Zum einen sind es die passiven Systeme, welche die von der Sonne eingestrahlte und vom Objekt reflektierte Strahlung in verschiedenen, mehr oder weniger breiten spektralen Kanälen abbilden, und zum anderen gibt es die aktiven Systeme (z. B. Radar) die eine eigene Strahlungsquelle besitzen. Sie fangen den reflektierten Anteil der selbst ausgesendeten Strahlung auf. Der Vorteil von den Radarsystemen liegt, bedingt durch die langwellige Strahlung, in ihrer relativen Unabhängigkeit von Witterungseinflüssen. Der Wert der Radaraufnahmen für die operationelle Anwendung in der Erdbeobachtung von Landflächen ist noch strittig, da die Interpretation der Radardaten noch erhebliche Schwierigkeiten bereitet (GAH 1996).

Die vorliegende Arbeit setzt sich nur mit den passiven, satellitengestützten Aufnahmesystemen im optischen und infraroten Bereich auseinander, da diese aufgrund der differenzierten spektralen Auflösung erfolgversprechender im Hinblick auf die Klassifizierung von Bodeneigenschaften erscheinen. In dem folgenden Abschnitt wird kurz das Aufnahmeprinzip der verschiedenen Aufnahmesysteme dargestellt, wobei an dieser Stelle auch auf die vielfältige Grundlagenliteratur der Fernerkundung verwiesen wird (z. B. KRONBERG 1985, HILDEBRANDT 1996, LILLESAND UND KIEFER 1987, SABINS 1987, GUPTA 1992 und SIEGAL und GILLESPIE 1980).

5.3.1 Passive Aufnahmesysteme

Die passiven Aufnahmesysteme lassen sich in technisch verschieden aufgebaute Systeme unterteilen. Es gibt zum einen die optisch-mechanisch arbeitenden Scanner, zu denen die Sensoren der Landsat-Reihe gehören und zum anderen die opto-elektronischen Sensoren, zu denen z. B. SPOT (Systeme pour l'Observation de la Terre) und IRS (Indian Remote Sensing Satellite) zählen. Der Unterschied der opto-elektronischen und -mechanischen Systeme liegt in der Art und Weise, wie die Daten der Erdoberfläche von ihnen aufgezeichnet werden. Des weiteren gibt es fotografische Sensoren, auf deren Darstellung im Rahmen der Arbeit verzichtet wird. Diese Aufnahmesysteme werden sowohl auf Satelliten als auch auf Flugzeugen eingesetzt.

Alle opto-mechanischen Sensoren haben den gleichen Grundaufbau, der jedoch in einzelnen Bereichen modifiziert sein kann. Die Scanner dieser Art benutzen zur Aufzeichnung der elektromagnetischen Strahlung einen rotierenden oder oszillierenden Spiegel, mit dem die Erdoberfläche streifenweise abgetastet wird. Dabei bewegt sich die Plattform (Satellit oder Flugzeug) in Flugrichtung fort. Über den Spiegel wird die Strahlung dem Detektor, bei multispektralen Scannern mehreren Detektoren, zugeführt. Die an den Detektoren eintreffende Strahlungsenergie wird in elektrische Signale (Photostrom) umgewandelt und nach einer Analog-Digital-Wandlung digital abgespeichert.

Die Sensoren der opto-elektronischen Bauart nehmen die Strahlung ebenfalls streifenweise auf, doch im Gegensatz zu den opto-mechanischen Scannern werden die Bildelemente des Streifens zeitgleich und nicht nacheinander abgebildet. Die Strahlung wird über ein Objektiv aufgenommen und durch eine Blende an die Detektoren weitergegeben, wo sie in ein

elektrisches Signal transformiert wird. Diese Bauart der Sensoren ermöglicht es mit zwei Objektiven Stereobildpaare aufzuzeichnen, die sich teilweise überlagern. Aus ihnen kann die dritte Dimension, d.h. die Höhe, abgelesen werden. Ein weiterer Vorteil der optoelektronischen Scanner ist, daß der Aufnahmevorgang nicht von mechanischen Bewegungen abhängig und deshalb die geometrische Verzerrung geringer ist, als bei den mechanisch operierenden Systemen. Mit der Wahl des Objektives kann die geometrische Auflösung in einem weiten Bereich variiert werden.

Der Unterschied zwischen satellitengestützten und flugzeuggestützten Fernerkundungsaufnahmen liegt in einer besseren räumlichen Auflösung der Flugzeugscannerdaten, deren flexiblen Aufnahmetermingestaltung und einer häufig größeren spektralen Auflösung gegenüber den Satellitendaten. Diesen Vorteilen der Flugzeugscannerdaten stehen aber erhebliche Probleme der Bildgeometrie gegenüber (KENNEWEG ET AL. 1996).

Die geometrische Verzerrung von streifenabtastenden Scanneraufnahmen ist als eine Stauchung der Bildinformation zu den Seitenrändern hin zu erkennen (Panorama-Verzerrung). Diese Verzerrung folgt einer einfachen Gesetzmäßigkeit und kann durch die Geokodierung (Kap.: 3.1 und 7.2) leicht korrigiert werden. Bei Flugzeugscannerdaten kommen die unregelmäßigen Einflüsse der atmosphärischen Turbulenzen hinzu, die zu komplizierten Verzerrungen führen und nur aufwendig zu entfernen sind. Ein veränderter Beobachtungswinkel des Scanners führt dazu, daß das gleiche Objekt ein anderes spektrales Signaturverhalten zeigt (MÜLLER 1987). Die Gestalt des Geländes bringt in geometrischer Hinsicht zusätzliche Komplikationen mit sich. In einem stark reliefiertem Gebiet ist eine nahezu korrekte Entzerrung nur mit der Verwendung eines digitalen Höhenmodells möglich (ALBERTZ 1991).

Die reliefbedingten Einflüsse auf die Bildgeometrie wirken sich bei Flugzeugscannerdaten stärker aus als bei Satellitenaufnahmen, bei denen sie oft vernachlässigt werden können. BÄHR (1985) nennt als kritische Marke für Landsat-TM Aufnahmen, ab der eine Verzerrung von einem Bildelement erfolgt, 230 m Höhenunterschied im Gelände (im Bereich des Streifenrandes). Bei den geringer auflösenden Landsat-MSS Aufnahmen liegt diese Höhe bei 780 m, was die Verwendung eines Höhenmodells nicht unbedingt erfordert, da die

Erdoberfläche durch ein Ellipsoid oder eine Kugel als glatte Ersatzfläche in diesem Fall genau genug bestimmt ist (BÄHR 1985).

Weitere Informationen zu dem Aufbau und der Funktionsweise der verschiedenartigen Aufnahmesysteme können z. B. bei HILDEBRANDT (1996) nachgeschlagen werden.

5.3.1.1 Spektrale Auflösung

Die Zusammensetzung der reflektierten elektromagnetischen Strahlung eines Objektes beinhaltet Informationen über dessen physikalische und chemische Eigenschaften. Die spektrale Auflösung eines Sensors wird von der Anzahl der Spektralkanäle und deren jeweilige Bandbreite bestimmt. Eine Zunahme der Anzahl der Spektralkanäle und eine Abnahme der Bandbreiten führt zu einer höheren Differenzierbarkeit der einzelnen Spektralinformation und zu einer Vervielfältigung der Aufnahmedaten eines Objektes. Die Erhöhung der spektralen Information über ein betrachtetes Objekt ermöglicht sicherere Rückschlüsse auf dessen physikalische und chemische Eigenschaften.

Die spektrale Auflösung, welche die verschiedenen operationell arbeitenden, satellitengestützten Sensoren haben, reicht in der Regel vom sichtbaren Bereich bis in das NIR hinein. Die größte spektrale Auflösung hat zur Zeit der Landsat-TM, der die Erdoberfläche in sieben verschiedenen Spektralbereichen aufzeichnet und dabei auch Bereiche des MIR und des thermalen Infrarotbereiches mit abdeckt. Im Bereich der flugzeuggestützten Systeme gibt es sogenannte hyperspektrale Sensoren, die eine weitaus höhere spektrale Auflösung haben. Weitere Angaben zu der spektralen Auflösung der beiden in der Arbeit verwendeten Sensoren werden in Kapitel 5.3.2 gemacht.

Welche spektralen Bereiche von größtem Interesse sind, hängt in der Regel von der jeweiligen Fragestellung ab und muß von dem jeweiligen Bearbeiter entschieden werden. Ein spektral hochauflösender MIR Bereich ist für geologische und bodenkundliche Fragestellungen sehr interessant, da in diesem Bereich zahlreiche Absorptionsbanden von Mineralien vorliegen 2-2.4 μm (BACH und MAUSER 1993). Dieser Aufnahmebereich wird von den satellitengestützten Systemen zur Zeit nur von dem Landsat-TM abgedeckt, weshalb die vorliegenden Untersuchungen hauptsächlich mit Landsat-TM-Datensätzen durchgeführt wurden. Auch wenn der Thematic Mapper nur sechs (ohne den Thermal IR) Kanäle bietet und deren

Informationsgehalt, aufgrund der relativ großen Bandbreite jedes einzelnen Kanals, reduziert ist, lassen sich wichtige Informationen zu chemischen Eigenschaften der Böden ungefähr ableiten und erkennen (BEN-DOR ET AL. 1995).

5.3.1.2 Geometrische Auflösung

Für rasterförmige, digitale Bildaufnahmen, sowie in der Bildverarbeitung wird die Kantenlänge eines Bildelements als Maß für die geometrische (räumliche) Auflösung des Datensatzes benutzt (ALBERTZ 1991). Diese Maßeinheit läßt eine einfache Vergleichbarkeit unterschiedlicher Aufnahmesysteme zu. Die geometrische Auflösung der Datensätze ist für die Interpretation von großer Bedeutung. Für ein Maximum an Information über die mitteleuropäische Landschaft ist eine hohe spektrale Auflösung notwendig, da jedes einzelne Pixel unabhängige Informationen über die Oberfläche beinhaltet. D. h. je mehr Pixel in einer Szene enthalten sind, desto mehr Information kann aus ihr entnommen werden (SHEFFIELD 1985).

Der Anteil an sogenannten Mischpixeln, die die Interpretation oder Klassifikation verfälschen, ist bei hochauflösenden Sensoren geringer. Hierzu machten SU ET AL. (1989) und BÜTTNER ET AL. (1989) vergleichende Untersuchungen von SPOT- und TM-Daten, die eine größere Klassifizierungsgenauigkeit der SPOT-Daten gegenüber den TM-Daten ergaben, wenn vergleichbare Spektralkanäle der beiden Systeme verwendet wurden. Aufgrund der sehr ähnlichen geometrischen und spektralen Eigenschaften des SPOT und des in den Untersuchungen verwendeten IRS Systems kann diese Aussage durchaus auf die IRS-Daten übertragen werden. Der Nachteil dieser beiden Sensoren gegenüber dem Landsat-TM liegt in ihrer geringeren spektralen Auflösung, die eine anspruchsvolle, differenzierte Trennung verschiedener Klassen einschränkt.

Auch für die Erkennbarkeit von bestimmten Objekten ist die geometrische Auflösung essentiell, da bei einer Pixelgröße von z. B. 30x30 m zu kleine Objekte nicht mehr abgebildet werden, sondern deren spektrale Information nur in der Mischinformation des Pixels enthalten ist. Die Mindestgröße eines eindeutig zu identifizierenden Objektes kann nach HABERÄCKER (1979) mit Hilfe des sogenannten Abtasttheorems berechnet werden. Demnach muß die minimale Ausdehnung die doppelte Länge der Diagonalen eines Bildelementes (Pixel) haben. In den Aufnahmen des Landsat-TM, deren geometrische Auflösung 30 m (in den Kanälen 1-5

und 7) ist, entspricht dies einer Länge von 84,85m (GLASER 1986). Für die Erkennbarkeit eines Objektes, spielt neben dem geometrischen Auflösungsvermögen des Aufnahmesystems aber auch der spektrale Kontrast zu dessen Umgebung und die Objekteigenschaften eine Rolle. „Das Zusammenwirken der hier beteiligten Faktoren läßt sich aber kaum abschätzen“ (ALBERTZ 1991). Insbesondere die Erkennbarkeit linienhafter Objekte macht deutlich, daß ein Fluß oder eine Straße nicht 80 m breit sein muß, um in einer Thematic Mapper Szene erkannt zu werden.

Im Hinblick auf die zugrundeliegende Fragestellung der Arbeit erscheint eine hohe geometrische Auflösung hilfreich und wünschenswert, um kleinräumige Bodenheterogenitäten zu erkennen und zu interpretieren. KLOEBFER (1994, KTBL) hält in diesem Zusammenhang eine räumliche Auflösung von 2 m für notwendig, um kleinräumige Heterogenitäten auf den Feldschlägen aufzuzeigen. Diese Forderung wird von keinem der derzeit in Umlauf befindlichen Systemen erfüllt. Die Aufnahmen der SPOT und IRS Sensoren haben im panchromatischen Bereich eine Auflösung von 10 m, bzw. bis zu 5m und stellen damit das zur Zeit bestauflösende Material dar. Die flugzeuggestützten Sensoren erreichen teilweise bessere Auflösungen, die eine Erkundung kleinräumiger Strukturen möglich erscheinen lassen.

5.3.1.3 Radiometrische Auflösung

Neben den geometrischen Zusammenhängen, zwischen dem abgebildeten Objekt und den aufgezeichneten Bilddaten besteht auch eine physikalische Beziehung. Diese wird durch die spektrale Zusammensetzung der elektromagnetischen Strahlung und deren Intensität dargestellt. Um einen Zusammenhang zwischen den Meßdaten und den zu beobachtenden physikalischen Eigenschaften herzustellen, müssen die Sensoren dementsprechend kalibriert werden (ALBERTZ 1991).

Die heute operationell eingesetzten satellitengestützten Scannersysteme sind normalerweise für einen Grauwertdynamikbereich von 256 Wertstufen ausgelegt. Dieser weite Dynamikumfang an Helligkeitsstufen wird allerdings in den seltensten Fällen völlig ausgenutzt. Dies liegt daran, daß ein Sensor in der Regel so ausgelegt ist, daß er ganz hell und ganz dunkel reflektierende Flächen auf einer Szene erkennen und aufnehmen kann. Aus diesem Grund stehen ihm nur sehr schmale Grauwertbereiche für die verschiedenen

Helligkeitsstufen zur Verfügung. Die meisten Rohdaten der Scanneraufnahmen haben einen relativ schmalen Grauwertbereich und zeichnen sich durch schwache Kontraste aus, da in der Natur selten so stark kontrastreich reflektierende Flächen nebeneinander existieren. Zum Zwecke der visuellen und digitalen Bildbearbeitung kann der Kontrastumfang der zu bearbeitenden Szene mit einer Grauwertmanipulation entgegengewirkt werden (*Kap.: 7.3.1*).

Die radiometrischen Eigenschaften des Landsat-TM sind Untersuchungen von ANUTA ET AL. (1984) zufolge sehr gut. Die Kalibrierung der Detektoren ist gut aufeinander abgestimmt, so daß es kaum zu Streifenbildung in den Bilddaten kommt. Radiometrische Störungen wie Bildaufhellungen sind aufgrund des geringen Scannwinkels gering (*Kap.: 5.3.1*).

5.3.2 Landsat-5-TM und IRS-1C

Im Rahmen der Arbeit fanden Aufnahmen der Satellitensysteme Landsat-5-TM und des IRS-1C Verwendung. In dem folgenden Abschnitt werden die beiden Sensoren mit ihren geometrischen und radiometrischen Daten, sowie den Daten ihrer orbitalen Umlaufbahn beschrieben. Die technischen Daten zur Beschreibung wurden dafür aus KRAMER (1996) entnommen. Dort sind auch eine Vielzahl anderer Fernerkundungssensoren beschrieben, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird.

Die Sensoren der 2ten Landsat Generation (Thematic Mapper), die seit 1982 in Betrieb sind, sind eine Weiterentwicklung des Landsat-MSS (Multispectral Sensor), der 1972 das erste Mal in die Erdumlaufbahn gebracht wurde und in den Landsat-Missionen 1-3 zum Einsatz kam. Mit Beginn der 4ten Landsat-Mission (1982) werden die Daten von dem siebenkanaligen Thematic Mapper Sensor (TM) aufgezeichnet. Der Thematic Mapper besitzt eine verbesserte spektrale und räumliche Auflösung sowie eine höhere radiometrische Empfindlichkeit gegenüber seinem Vorgänger. Er ist in der Wahl der einzelnen Aufnahmekanäle so ausgerichtet, daß die atmosphärischen Absorptionsbanden ausgeschlossen bleiben und die Einflüsse der Transmission durch die Atmosphäre minimiert werden (GUPTA 1991). Im Gegensatz zu den früheren Landsat-Missionen ist es möglich, Daten zu jeder Zeit direkt zur Erde zu senden. Die aufwendige, datenmengenlimitierende Zwischenspeicherung an Bord des Satelliten ist mit dieser technischen Weiterentwicklung hinfällig geworden und ermöglicht die bessere und schnellere Verarbeitung größerer Datenmengen.

Der Thematic Mapper Sensor ist ein multispektraler, opto-mechanischer Scanner, der die Daten der Erdoberfläche im sichtbaren und infraroten Wellenlängenspektrum aufzeichnet. Hierfür stehen in diesem Bereich sechs Kanäle bereit. Ausgehend von den Erfahrungen der ersten Landsat-Generation wurden mit den Kanälen TM-5 und TM-7 im mittleren Infrarotbereich Spektralbereiche berücksichtigt, die besonders für geologische und pedologische Untersuchungen im Hinblick auf die Reflexion verschiedener Materialien geeignet sind. Zusätzlich verfügt er noch über einen thermalen Infrarotkanal, der es ermöglicht Temperaturunterschiede auf der Erdoberfläche zu lokalisieren. Dieser Kanal unterscheidet sich in seiner geometrischen Auflösung, mit 120 m, von den anderen 6 Kanälen, bei denen diese 30 m beträgt (Tab.: 5).

Durch die verbesserte geografische Auflösung lassen sich von Landsat-5-TM Aufnahmen problemlos Vergrößerungen im Maßstab von 1:50000 und maximal 1:25000 anfertigen, ohne daß die Pixelstruktur störend hervortritt (HILDEBRANDT 1992).

Tab. 5: Technische Daten der satellitengestützten Aufnahmesysteme.

Landsat-5 TM			IRS-1C		
Band	Bandbreite	Auflösung	Band	Bandbreite	Auflösung
1	0.45-0.52 μm	30 m	pan	0.5-0.75 μm	≤ 10 m
2	0.52-0.60 μm	30 m	LISS 1	0.52-0.59 μm	23.5 m
3	0.63-0.69 μm	30 m	LISS 2	0.62-0.68 μm	23.5 m
4	0.76-0.90 μm	30 m	LISS 3	0.77-0.86 μm	23.5 m
5	1.55-1.75 μm	30 m	LISS 4	1.55-1.75 μm	70.8 m
7	2.08-2.35 μm	30 m			
6	10.4-12.5 μm	120 m			

Die Satellitenplattform umkreist die Erde in einem sonnensynchronen, Orbit, in einer Höhe von 705 km und mit einem Inklinationwinkel von $98,2^\circ$. Während einer 99 Minuten dauernden Umrundung werden Szenen von 185×172 km gescannt und an die Bodenstationen übermittelt. Dies geschieht in einem orbitalen Zyklus von 16 Tagen, in dem der Landsat-5-TM die gleiche Stelle überfliegt und multitemporale Daten aufzeichnet. Die *Abbildung 3* zeigt die Aufnahmestreifen des Sensors mit den Szenenmittelpunkten, angegeben in Path und Row.

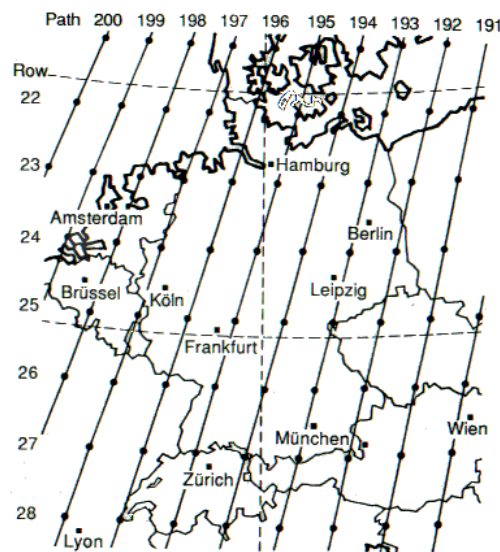


Abb. 3: Referenzsystem (WRS=Worldwide Reference System) für Landsat 4 (aus ALBERTZ 1991).

Der LISS-III Sensor (Linear Imaging self-scanning sensor) des indischen IRS-1C Satelliten unterscheidet sich in seiner räumlichen und spektralen Auflösung vom Landsat-TM. Die indische IRS-1C Mission begann Ende des Jahres 1995. Dieser Satellit hat einen polar sonnensynchronen Orbit mit einem Inklinationwinkel von $98,71^\circ$ und überfliegt die Erde in einer Höhe von 817 km (KRAMER 1996). Eine Erdumrundung wird in der Zeit von 101.23 Minuten zurückgelegt. Die Wiederholungsrate der Aufnahmen beträgt 24 Tage.

Der LISS-Sensor besteht aus drei verschiedenen Kamerasensoren. Der eine Sensor (PAN) liefert panchromatische Daten mit einer hohen, geografischen Auflösung von $\leq 10\text{m}$, aber nur mit einer Grauwertdynamik von 64 Helligkeitsunterschieden. Der zweite Sensor (LISS-III), ist für multispektrale Daten ausgelegt, die in vier verschiedenen spektralen Bereichen mit einer radiometrischen Auflösung von 128 Grauwerten aufgezeichnet werden. Die geografische Auflösung beträgt bei den ersten drei Kanälen (VNIR) 23.5m und bei dem vierten (SWIR) 70.8 m. In dem Aufnahmeprotokoll, das von dem Vertreiber, in diesem Fall dem *Geoforschungszentrum Potsdam*, mit ausgeliefert wird, ist die geometrische Auflösung der PAN-Daten mit 5 m und die der LISS mit 25 m angegeben. Zusätzlich zu diesen beiden Sensoren ist noch ein dritter an Bord des Satelliten, der so programmiert ist, daß er gleich bei der Aufzeichnung einen Vegetationsindex aus LISS 2 und LISS 3 berechnet und diesen abbildet. Die geografische Auflösung dieser Aufnahmen beträgt allerdings nur 188 m und ist für die kleinräumige Kulturlandschaft Mitteleuropas daher relativ ungeeignet.

Untersuchungen von KUDRAT ET AL. (1992) zeigten, daß die spektrale und geometrische Auslegung der IRS-LISS-Sensors für eine akzeptable Klassifizierung von Böden ausreicht und dessen Daten für derartige Fragestellungen durchaus herangezogen werden können.

5.4 Die Szene beeinflussende Parameter

Die abgebildete Szene wird bei der Aufnahme verschiedenen Einflüssen unterworfen, die das spektrale Signal der Erdoberfläche verfälschen können, und deshalb bei der Betrachtung oder Interpretation nicht außer acht gelassen werden dürfen. Die Reflexion des Objektes ist dabei insbesondere abhängig von der Exposition (Hangrichtung), der Inklinan (Hangneigung), der Höhe über N.N. und der Illumination, sowie den jeweiligen atmosphärischen Bedingungen, die zum Zeitpunkt der Aufnahme vorherrschen.

5.4.1 Atmosphäre

Die Atmosphäre verfälscht das reflektierte Signal und die darin enthaltene Information der Erdoberfläche in verschiedener und vielfältiger Weise (*Kap. 5.2.1*). Zum einen fügt sie dem spektralen Signal der Erdoberfläche zusätzliche, von der Oberfläche gänzlich unabhängige spektrale Information hinzu, und zum anderen absorbiert sie in einigen Wellenlängenspektren die reflektierte Bodenstrahlung. Die in Kapitel 5.2.1 beschriebene Streuung der elektromagnetischen Strahlung auf dem Weg durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche hin und von dieser zurück zum Aufnahmesensor führt ebenfalls zu einer Verfälschung des spektralen Abbildes des betrachteten Objektes. Der Einfluß der Atmosphäre auf die spektrale Signatur kann nach BEGNI (1982) unterteilt werden in:

- die Streuung an Aerosolen (Mie-Streuung)
- die Streuung an Luftmolekülen (Rayleigh-Streuung)
- und die Absorption an Ozon und Wasserdampf

Die Atmosphäre streut die reflektierte Bodenstrahlung in die Umgebung des betrachteten Bildelements und vermindert durch diesen sogenannten Überstrahlungseffekt (RICHTER 1992) die Kontraste im Bild. Dieser Überstrahlungseffekt kann bei Wellenlängen des MIR für gewöhnlich vernachlässigt werden (RICHTER 1992). Dunkle Flächen, die von helleren Flächen umgeben sind, erscheinen aus diesem Grund heller, als sie es für einen Betrachter vor Ort tun.

Dieser Effekt, der eine gewisse Unschärfe im Bild hervorruft, tritt bei Satellitensensoren mit einer hohen räumlichen Auflösung, wie z. B. dem Landsat-TM (Bodenauflösung von 30 m), dem IRS-1C (5-10 m) und dem SPOT (10-20 m), besonders deutlich auf.

Insgesamt führt der Einfluß der Atmosphäre zu einer Modifikation der spektralen Information der Erdoberfläche und zu einer Verschlechterung der räumlichen Auflösung der abgebildeten Szene. Die Auswirkungen des atmosphärischen Einflusses sind dabei auf kurze Wellenlängen stärker als auf die des längerwelligen Spektralbereichs. Der blaue Kanal (0.45-0.52 μm) wird dadurch mehr beeinflusst und verändert, als es bei den anderen Kanälen der Fall ist. Im Bereich des MIR (1.55-2.35 μm) ist der Einfluß in der Regel vernachlässigbar (VAN DER MEER ET AL. 1995). Nach KIRCHHOF ET AL. (1985) führt die atmosphärische Streuung in den Landsat-Kanälen TM-5 und TM-7 dazu, daß dunkle Objekte heller und helle Objekte dunkler erscheinen. Eine der verschiedenen Möglichkeiten der Korrektur des atmosphärischen Einflusses werden in Kapitel 7.3.2 beschrieben.

Bei den optischen Sensoren spielt die Wolkenbedeckung eine weitere, wesentliche Rolle. Für diese Art von Sensoren ist es nicht möglich, Aufnahmen der Erdoberfläche durch eine Wolkendecke hindurch zu erstellen. Das Vorhandensein von Wolken zum Aufnahmezeitpunkt führt daher in der Regel zur Unbrauchbarkeit der Satellitenszene, was jedoch von dem jeweiligen Bedeckungsgrad abhängig ist.

5.4.2 Sonneneinfallswinkel

Der Einfluß des Sonnenstandes zum Aufnahmezeitpunkt auf das spektrale Abbild der Erdoberfläche steht in engem Zusammenhang mit dem Einfluß des Reliefs (*Kap. 5.4.3*). Das Ausmaß des reliefbedingten Schattenwurfs wird grundlegend vom Sonnenstand bestimmt. Eine tiefstehende Sonne führt zur Ausbildung langer Schatten von Bergkuppen oder von Bäumen, welche die Interpretation der Szene erschweren. Diese Einwirkungen auf die Belichtungsunterschiede können mit der Verwendung einer Sommerszene minimiert werden. In Mitteleuropa steht die Sonne im Sommer nahezu senkrecht am Himmel, so daß insbesondere zur Mittagszeit der Schattenwurf nur gering ausgebildet ist. Bei der Verwendung von Aufnahmen anderer Jahreszeiten muß der Sonneneinfall innerhalb der Auswertung mit beachtet werden.

Bei ebenen Flächen, bei denen der reliefbedingte Schattenwurf kaum eine Rolle spielt, kommt es zu jahreszeitlich bedingten Unterschieden in der Illumination der Flächen. Die Illumination ergibt sich aus dem Winkel, mit dem die eingestrahlte Sonnenenergie zum Zeitpunkt des Satellitenüberfluges auf eine Fläche trifft und ist damit abhängig von dem jeweiligen Sonnenstand. Dieser Aspekt ist insbesondere bei multitemporalen Monitoringauswertungen zu beachten.

5.4.3 Topografie

Das Relief des Geländes beeinflusst die Fernerkundungsaufnahme auf zweierlei Weise: zum einen führt es zu geometrischen Verzerrungen, die allerdings im Zuge der Geokodierung auf ein Digitales Höhenmodell minimiert werden (*Kap.: 5.3.1*). Zum anderen kann das Relief im Zusammenspiel mit dem Sonnenstand (*Kap. 5.4.2*) zu Schattenwurf führen und bei Flächen gleicher spektraler Information unterschiedliche Reflexionswerte hervorrufen. Die Betrachtung ein und desselben Bodentyps in einem sonnigen und einem schattigen Bereich zeigt unterschiedliche Reflexionseigenschaften, die bei einer automatischen, computergestützten Klassifikation zu Fehlklassifizierungen führt. Besonders in stark reliefierten Gebieten werden dadurch die Klassifizierungen erheblich erschwert und ungenauer. Eine Möglichkeit, den Einfluß der Belichtungsunterschiede infolge des Reliefs zu minimieren, stellt die Quotientenbildung zweier spektraler Kanäle eines Datensatzes dar (*Kap.: 7.4.1*).

Die Höhe über N.N. hat ebenfalls einen Einfluß auf die spektrale Signatur der betrachteten Fläche. Untersuchungen von SCHARDT (1990) an Waldbeständen zeigten, daß die Grauwerte im sichtbaren Spektralbereich mit steigender Höhe abnehmen, wobei der Einfluß mit abnehmender Wellenlänge zunimmt. Das variierende Reflexionsverhalten kann damit erklärt werden, daß mit zunehmender Höhe die Mächtigkeit der Atmosphäre zwischen Scanner und Objekt abnimmt und dadurch geringere atmosphärische Beeinträchtigungen stattfinden.

Neben den direkten Einwirkungen des Reliefs auf die Reflexion einer Fläche besteht auch noch ein indirekter Einfluß, der das Erkennen und Interpretieren von Feldheterogenitäten erheblich beeinträchtigt. Durch die unterschiedlichen Belichtungssituationen wird z. B. das Abtrocknungsverhalten des Bodens beeinflusst. Unterschiedlich feuchte Böden werden als Heterogenität erkannt, doch läßt sich bei gleichen Böden eine Interpretation der Heterogenität

nur mit Hilfe einer topografischen Karte erreichen. Die Zuhilfenahme topografischer Information ist von daher sehr wichtig und trägt zu einer verbesserten und genaueren Interpretation bei (Kap.: 6.5).

5.4.4 Art der Landbewirtschaftung

Die Bodenbearbeitung beeinflusst die Strukturen und Muster innerhalb eines Schlages. Sie führt in der Regel zu einer Homogenisierung der schlaginternen Bildmuster. Eine Heterogenisierung dagegen wird vor allem durch bodenerosive Vorgänge hervorgerufen (SCHRÖDER 1989). Den Nachweis für einen Zusammenhang der schlaginternen Bildmuster und der räumlichen Heterogenität innerhalb eines Schlages lieferte VILLWOCK (1983) in seinen Untersuchungen zur standörtlichen Heterogenität landwirtschaftlicher Nutzflächen (SCHRÖDER 1989).

Der Bearbeitungszustand zum Zeitpunkt der Aufnahme kann das spektrale Abbild des Bodens beeinflussen. Der Zusammenhang zwischen Bodenbearbeitung und Bodenrauhigkeit spielt dabei die entscheidende Rolle (Kap. 6.1.2). Die Oberflächenrauhigkeit des Bodens beeinflusst die Richtungsabhängigkeit der reflektierten Strahlung und die Selbstbeschattung der Fläche. Durch das Pflügen des Feldes erhöht sich die Rauigkeit der Oberfläche, und die Reflexionsintensität nimmt ab. Nach der Saatbereitung nimmt der Reflexionswert infolge der Glättung wieder zu (GEOSCAN 1995). Zu einer Glättung der Oberfläche von Ackerstandorten kommt es auch, wenn sich bei Austrocknung des Bodens eine Kruste ausbildet, was besonders in semiariden Gebieten mit kapilarem Grundwasseraufstieg vorkommt. Diese Glättung führt insbesondere im Bereich von 0,43-0,83 μm zu einer Erhöhung der Reflexionsintensität der Oberfläche. Eine Krustenbildung bei austrocknenden Ackerstandorten kann auch bei den thüringischen Lehm Böden beobachtet werden. Jedoch bleibt zu hinterfragen, ob diese Krustenbildung die gleichen Auswirkungen, wie in semiariden Gebieten hat. Nach CIERNIEWSKI ET. AL (1987) werden dunklere Böden weniger stark durch unterschiedliche Oberflächenstrukturen beeinflusst, als es bei helleren Bodentypen der Fall ist. Dies gilt insbesondere für den Bereich zwischen 0,4 und 0,8 μm des elektromagnetischen Spektrums.

Für eine automatische Klassifikation wäre es sinnvoll optimalerweise nur Schlagbereiche mit gleichem Bearbeitungszustand zu verwenden (SCHRÖDER 1989), um die Quellen für

Fehlklassifikationen zu minimieren. Diese Forderung läßt sich allerdings schwer erfüllen bzw. überprüfen. In den seltensten Fällen werden in größeren Untersuchungsräumen alle Nutzflächen zum gleichen Zeitpunkt einen identischen Bearbeitungsstand aufweisen. Es muß daher in der Regel ein gewisser Grad an Fehlklassifikationen akzeptiert, oder eine andere Bildvorbehandlung vorgenommen werden.

5.5 Anwendungspotential der Fernerkundung in der Landschaftsplanung

Die von dem Aufnahmesensor aufgezeichnete elektromagnetische Reflexionsstrahlung wird von systemspezifischen (*Kap.: 5.3.2*) und objektspezifischen Abbildungsparametern bestimmt. Die Modifikationen der objektspezifischen multispektralen Reflexion durch äußere Einflüsse (*Kap.: 5.4*) und die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen objektspezifischen Abbildungsparametern untereinander (*Kap.: 6*) sind vielfältig, so daß die Kenntnis dieser Zusammenhänge für die Interpretation von optischen Fernerkundungsdaten sehr bedeutsam ist.

Die Verwendung von Fernerkundungsmethoden zur Datenerhebung und Erarbeitung von Planungsgrundlagen spricht prinzipiell zwei Bereiche an. Zum einen ist das Ziel die Substitution konventioneller Erhebungsmethoden und zum anderen die Gewinnung zusätzlicher Information, die in den konventionellen Kartenwerken nicht enthalten ist (AMLER 1992).

Die effiziente Verarbeitung von Satellitendaten erfolgt auf der Basis eines GIS, indem die enthaltene Information integrativ mit anderen Informationsebenen zusammengeführt wird. Durch die Verknüpfung verschiedener raumbezogener Datenebenen kann das Informationspotential maximal ausgenutzt werden. Digitale Satellitendaten fanden in Mitteleuropa bisher wenig Anwendung für landschaftsplanerische und landschaftsökologische Zwecke. Der Hauptgrund dafür liegt in der zu geringen, räumlichen Auflösung der Bilddaten, welche die Erkennbarkeit von Einzelobjekten und kleinräumigen Strukturen in der Landschaft nur eingeschränkt zuläßt (ZÖLITZ-MÖLLER ET AL. 1997).

In den verschiedenen Planungsdisziplinen haben Geografische Informationssysteme in letzter Zeit vermehrt Einzug erhalten. Die grundlegende Voraussetzung für die Nutzung dieses Werkzeugs in der Landschaftsplanung, ist das Vorhandensein digitaler Geodaten für den

entsprechenden Planungsraum. ZÖLITZ-MÖLLER ET AL. (1997) sehen den Bedarf an verwertbarer, digitaler Geländeinformation zur Zeit jedoch keineswegs in befriedigender Weise gedeckt. Besonders auf der lokalen Ebene der Landschaftsplanung (Landschaftsplan) herrschen große Defizite vor. Die Mängel werden vor allem in den zu hohen Beschaffungskosten, der fehlenden Aktualität und der zu groben Auflösung der Daten gesehen. Für ein nachhaltiges Planungskonzept ist die aktuelle Bestandsdatenerhebung von elementarer Bedeutung, um die Funktionen und die Potentiale des Landschaftshaushalts beschreiben, bewerten und analysieren zu können. KENNEWEG (1992) sieht weitere Probleme für die landschaftsplanerische GIS-Anwendung in den verschiedenen administrativen Planungsebenen der Landschaftsplanung. Da die verschiedenen Planungsebenen mit unterschiedlichen Maßstäben arbeiten, wird zum einen der Datenverkehr zwischen den einzelnen Ebenen erschwert und zum anderen variiert der Datenerhebungsaufwand von Planungsebene zu Planungsebene.

Digitale Information über die Erdoberfläche, die auf der Basis eines GIS mit Daten konventioneller Erhebung zusammengeführt und integrativ verarbeitet und ausgewertet werden kann, wird durch die Geofernerkundung geliefert. In der Datenakquisition kommt der Fernerkundung eine wachsende Rolle zu, da aktuelle Daten zur Verfügung gestellt werden können. Andere Vorteile gegenüber der konventionellen Datenerhebung liegen in der schnellen und kontinuierlichen Erfassung und des geringeren Kosten- und Arbeitsaufwands. Satellitendaten ermöglichen eine rationelle Erfassung von Flächennutzungs-, Boden- und Standortdaten sowie Gefährdungspotentialen, die während der Bestandsaufnahme und Bewertung des Landschaftshaushalts innerhalb des Planungsablaufs herangezogen werden können. So basieren z. B. die Bodenbedeckungsdaten des CORINE-Landcover-Programms auf der Auswertung von Landsat-Szenen (EINIG ET AL. 1997), wobei kleinstrukturierte Landschaftselemente aufgrund der geometrischen Auflösung des Aufnahmesystems nicht erfaßt oder unterrepräsentiert dargestellt werden.

Die hauptsächlichen Anwendungsgebiete der Fernerkundung in Mitteleuropa liegen derzeit nicht in der Erkundung von Böden, sondern vielmehr in der Analyse und Bewertung von Vegetationsbeständen. Die Auswertung multispektraler Datensätze in diesem Bereich findet insbesondere in Waldschadenserhebungen, -diagnosen, Landnutzungsklassifikationen und Biotopkartierungen wachsende Verwendung.

KENNEWEG (1989) sieht die Einsatzmöglichkeiten von Satellitenaufnahmen vor allem in den folgenden Bereichen:

- großräumigen Waldkartierung
- Waldschadensdiagnose
- Erosionsgefährdung
- Landnutzungsveränderung
- Landnutzungsplanung

In der intensiv genutzten und kleinräumig strukturierten Landschaft Mitteleuropas gelangt die Fernerkundung mehr über die Luftbildinterpretation oder Flugzeugscanneraufnahmen, als über die Analyse von Satellitendaten zur Anwendung. Dies liegt zum einen in der teilweise zu geringen geografischen Auflösung der Satellitendaten und zum anderen in der flexiblen Wahl des Aufnahmezeitpunktes bei flugzeuggestützten Systemen. Mit fortschreitender technologischer Entwicklung ist davon auszugehen, daß in Zukunft Satellitenaufnahmen geliefert werden können, die in der Aufnahmequalität den Luftbildern gleichwertig sind. Alle Informationen die in bisherigen Forschungen anhand von Luftbildanalysen ermittelt wurden, sind potentiell auch in Satellitendaten enthalten. Die Anwendungsgebiete der Luftbildinterpretation können bei technischer Gleichwertigkeit der Aufnahmesysteme auch von den Satellitendaten erschlossen werden.

Die Hauptanwendungsbereiche der Satellitenfernerkundung liegen derzeit vor allem in den Ländern der Dritten Welt. Aufgrund der größtenteils großräumigen Strukturen und den fehlenden raumbezogenen Datengrundlagen in diesen Länder besteht hier ein großes Nutzungspotential. In Projekten der Entwicklungszusammenarbeit werden Satellitendaten z. B. in Landnutzungsklassifikationen erfolgreich verwendet. AMLER (1992) sieht den Einsatzbereich der Fernerkundung zur Datenerhebung im Rahmen der Landnutzungsplanungen in verschiedensten Disziplinen:

- Landnutzungsklassifizierung (aktuell und Monitoring)
- Vegetationsinventur
- Forstwirtschaft

- Hydrologie
- Geologie
- Geomorphologie
- Ertragsprognosen
- Landschaftsanalysen
- Bodenklassifikationen (Luftbild)

Mit Hilfe der Satellitenfernerkundung ist es möglich, die Biotop- und Landnutzungskartierung auf aktuellem Stand zu halten. Im Rahmen der Vegetationsinventur an der Erdoberfläche stellt diese Datenerhebung den Hauptanwendungsbereich dar und dient umweltbezogenen Planungen als Datengrundlage. Weitere Anwendungsgebiete der Fernerkundung liegen in speziellen planerischen Fragestellungen, von denen eine Auswahl im Folgenden zusammenfassend dargestellt wird:

Multispektrale Fernerkundungsdaten können u. a. innerhalb wasserbaulicher Renaturierungsprojekte integriert werden (BRAUN 1995). Die aufgezeichneten Landnutzungsdaten der Gewässereinzugsgebiete werden im Hinblick auf ihren positiven oder negativen Einfluß auf die Wasserhaushaltsdynamik analysiert und bewertet. Es lassen sich Flächen ausweisen, die für eine Senkung des Hochwasserrisikos einer Umgestaltung bedürfen. Die Fernerkundung kann mit geringem Aufwand Informationen liefern, die für ein nachhaltiges Wassermanagement planungsrelevant sind.

Innerhalb von Freiraumplanungen können mit Hilfe der Fernerkundung gliedernde und belebende Landschaftselemente kartiert werden. Diese landschaftlichen Kleinstrukturen und ihre landschaftsgestalterische Funktion hinsichtlich des Landschaftsbildes lassen sich bewerten. Für die Kartierung von flächenhaften, linienförmigen und punktförmigen Landschaftselementen sind hochauflösende Satellitensysteme notwendig. Die zur Zeit operationell eingesetzten satellitengestützten Aufnahmesysteme liefern jedoch lediglich panchromatische Daten in einer verwertbaren, räumlichen Auflösung. Mit Hilfe der Integration multispektraler Daten in die hochauflösenden panchromatischen Daten (*Spectral Merge*) kann auch auf die spektrale Information der Objekte zurückgegriffen werden (KIRST und REICH 1997).

Ein weiterer Einsatzbereich sowohl von Satellitendaten, als auch von multispektralen Luftbildern liegt in der Waldschadenskartierung und –diagnose. Verschiedene Arbeiten zeigten in der Vergangenheit, daß anhand multispektraler Scannerdaten gute Ergebnisse in diesem Bereich erzielt werden konnten (u.a. KENNEWEG ET AL. 1996, HOFFMANN 1992, KEIL ET AL. 1990). Mit der Verwendung von Satellitendaten wird eine Informationsquelle für großflächige Analysen erschlossen, die anders nicht verfügbar ist (KENNEWEG ET AL. 1991).

Die größten Erfolge in geologischen und bodenkundlichen Erkundungen werden in ariden und semi-ariden Regionen erzielt, da dort das spektrale Signal der Erdoberfläche selten durch vorhandene Vegetation modifiziert ist. In verschiedenen Arbeiten wurden akzeptable geologische Kartierungen mit Satellitendaten erstellt. Es können sowohl geologische Strukturen kartiert (z. B. HILDEBRANDT 1992, ALAILY 1985), als auch unterschiedliche Bodenformen (*Kap. 6.5*) bestimmt werden. KUCERA (1984) vergleicht die Zuverlässigkeit von Studien mit flugzeug- und satellitengestützten Fernerkundungsaufzeichnungen zur Bestimmung des Bodentyps in ariden und humiden Gebieten. Er kommt dabei zu dem Ergebnis, daß in den ariden Gebieten die Luftbildauswertung deutlich besser geeignet ist, das Ergebnis der beiden Datenquellen in sub-humiden Regionen dagegen nahezu identisch ausfällt. Die Luftbildinterpretation zeigt für aride Gebiete eine deutlich höhere Übereinstimmung mit den Felduntersuchungen als in sub-humiden und humiden Regionen.

VOLK (1992) zeigt, daß die in den Satellitendaten erkennbaren geologischen Strukturen erfolgreich für die Lokalisierung von Grundwasservorkommen in ariden Gebieten genutzt werden können (VOLK 1992). Mit der Auswertung der Satellitendaten konnten potentielle Flächen ausgewiesen werden, die mit Felduntersuchungen verifiziert werden mußten. Die bereitgestellten Daten waren eine große Unterstützung für die Planung und Organisation der Feldarbeit, die somit auf ein Minimum reduziert werden konnte.

Ein weiterer Anwendungsbereich der Bodenfernerkundung liegt in der Kartierung großflächiger Versalzungserscheinungen auf Agrarstandorten. DWIWEDI (1992) führte eine solche Untersuchung anhand von Landsat-TM Aufnahmen erfolgreich durch. Im Rahmen von Landnutzungsplanungen und einem nachhaltigen Ressourcenmanagement kommt diesem Anwendungspotential besonders in ariden und semi-ariden Regionen eine große Bedeutung zu.

Ebenfalls für den Bereich Landnutzungsplanung und Ressourcenmanagement ist die Kenntnis über den Erosionsprozeß sowie die Erosionsgefährdung und die Erfassung von Erosionserscheinungen relevant, um nachhaltige Schutzmaßnahmen planen und einleiten zu können. Sowohl Winderosion, als auch langfristige und kurzfristige Wassererosion sind dabei von Interesse. Es gibt verschiedene Arbeiten, die eine erfolgreiche Verwendung von Fernerkundungsdaten, sowohl von Flugzeugsystemen als auch von satellitengestützten Sensoren, im Rahmen der Erkundung und des Monitorings von Erosionserscheinungen dokumentieren (u. a. DWIVEDI ET AL. 1997). Langfristige Flächenerosion stellt einen Grund für die Existenz von Feldheterogenitäten dar (*Kap.: 2.1.1*). Die Lokalisierung dieser Erscheinungen mit Satellitendaten wurde u. a. von BRIXY (1997), LEONE (1995) und HILL (1994) nachgewiesen (*Kap.: 6.5*). SCHRÖDER (1986, 1988, 1989) dagegen zeigte in verschiedenen Arbeiten die Lokalisierung erodierter Teilgebiete landwirtschaftlicher Nutzflächen anhand flugzeuggestützter Multispektralaufnahmen. Die Lokalisierung von kurzfristigen Erosionserscheinungen (Rillen) in Landsat-TM Szenen stellt sich für mitteleuropäische Gebiete als schwierig heraus, da die Erosionsrillen meist zu geringe Dimensionen zeigen, als daß sie in der räumlichen Auflösung des Thematic Mapper erkannt werden können. In besser auflösenden Aufzeichnungen ist dagegen durchaus mit der erfolgreichen Lokalisierung dieser linienhaften Erscheinungen zu rechnen, da sie in Luftbildaufzeichnungen deutlich zu erkennen sind (MAGDEBURG 1999). Die Möglichkeiten zur Erfassung der in Deutschland auftretenden Bodenverwehung wurden u. a. von HASSENPFUG ET AL. (1972) in Schleswig-Holstein anhand von Luftbildern untersucht und nachgewiesen.

Mit dem Vergleich multitemporaler Datensätze können Umweltveränderungen, -zerstörungen und Gefährdungspotentiale, sowie im Landschaftshaushalt ablaufende Prozesse aufgedeckt und analysiert werden. Im Rahmen der Umweltüberwachung (Monitoring) spielt die Fernerkundung daher eine große Rolle. Für ein nachhaltiges Umweltmanagement und eine nachhaltige Ressourcenplanung ist die Kenntnis über die Dynamik der Erosions- und Versalzungsprozesse der Agrarstandorte von elementarer Bedeutung, um hinreichende Planungsvorgaben zu entwickeln. Das Monitoring dient aber auch der Ergebniskontrolle von planerischen Umsetzungen. Insbesondere für Planungen, die dynamische Prozesse beeinflussen sollen, ist es wichtig, daß die Resultate kontrolliert werden können. In diesem

Bereich sieht KENNEWEG (1992) eine große Bedeutung für die Informationsgewinnung durch die Fernerkundung.

Die sehr differenzierten Anwendungsbereiche der Fernerkundung zeigen, welch großes Potential zur Datenerfassung in dieser Technik steckt. Innerhalb des Planungsprozesses oder von Umweltverträglichkeitsstudien kommt der Datenerfassung zur Analyse des Bestandes sowie zur Bewertung der Funktions- und Leistungsfähigkeit und des Potentials des Landschaftshaushaltes eine essentielle Rolle zu. In der Planungspraxis wird die Datenerhebung häufig aus Kostengründen nur in einem (zu) geringen Umfang durchgeführt. Die Geofernerkundung liefert einen kostengünstigen, großräumigen und informativen Überblick über die Umweltsituation in dem Planungsraum, wodurch diese Mängel in der Planung verringert werden können. Bei der Deckung des Informationsbedarfs darf sich aber nicht nur auf die Fernerkundung gestützt werden, sondern es müssen immer Zusatzdaten, sogenannte Kontrolldaten mit herangezogen werden, die über die Feldmethode oder durch Luftbilddauswertung erhoben werden müssen. Sie sind notwendig um die Aussagewahrscheinlichkeit der Ergebnisse der Fernerkundungsinterpretation und -klassifizierung zu überprüfen. Für die zeit- und kostensparenden Informationsbeschaffung werden häufig statistische Verfahren herangezogen, die durch die Fernerkundung unterstützt werden können. Die Auswahl der Probeflächen bei der Stratifikation, einer gängigen statistischen Methode, kann z.B. durchaus auf einer Stratenbildung beruhen, die auf automatisch klassifizierten Satellitenbildern basiert. Das Ziel der Stratenbildung ist die Schaffung möglichst in sich homogener Probeflächen, was auch durch die automatischen Klassifizierungsverfahren verfolgt wird.

6 Allgemeine Reflexionseigenschaften

Die spektrale Signatur eines Objektes wird von dessen chemischen und physikalischen Eigenschaften bestimmt. Jedes Objekt auf der Erdoberfläche hat seine spezifische Spektralsignatur und Reflexionskurve. Diese spektralen Eigenarten sind die Grundlage der multispektralen Klassifizierung unterschiedlicher Landnutzungen. Die Unterschiede in der spektralen Reflexion verschiedener Objekte an der Erdoberfläche, wie Wasser, Wald, Ackerfläche, Siedlungsfläche und vegetationsloser Boden sind teilweise ganz eindeutig und ohne Schwierigkeiten zu differenzieren.

Da sich das Thema der vorliegenden Arbeit mit der spektralen Heterogenität von Bodenoberflächen auseinandersetzt, wird in den folgenden Kapiteln hauptsächlich auf die Reflexionseigenschaften von Böden und deren Ursache eingegangen (*Kap.: 6.1*). Die Absorptions- und Reflexionseigenschaften der Vegetation werden in *Kapitel 6.2* dargelegt und die Unterschiede zur Bodenreflexion aufgezeigt. In der Abbildung 4 sind die Reflexionskurven von einem Boden, der Vegetation und von Wasser dargestellt. Die Kurven zeigen über das gesamte Wellenlängenspektrum einen eindeutig unterschiedlichen Verlauf, wodurch es möglich ist, die verschiedenen Materialien spektral voneinander abzugrenzen.

Verschiedene Böden zeigen in der Regel nicht so eindeutige spektrale Unterschiede. Eine Differenzierung aufgrund der spektralen Eigenschaften ist daher schwieriger und nur in einzelnen Spektralbereichen möglich. Oberflächenmaterialien weisen teilweise typische Absorptionsbanden auf, in denen sie sich von spektral ähnlich reflektierenden Objekten unterscheiden. Diese Bereiche, in denen eine Differenzierung erfolgen kann, sind jedoch häufig nicht breiter als 20 – 40 nm (BAUCH UND MAUSER 1993). Aufgrund dieser schmalen Spektralbereiche sind diese Absorptionsmuster häufig nicht mit den im Orbit befindlichen Aufnahmesystemen zu erkennen, da die Aufnahmekanäle der Sensoren Bandbreiten von 100 – 200 nm besitzen (*Kap.: 5.3.1.1*).

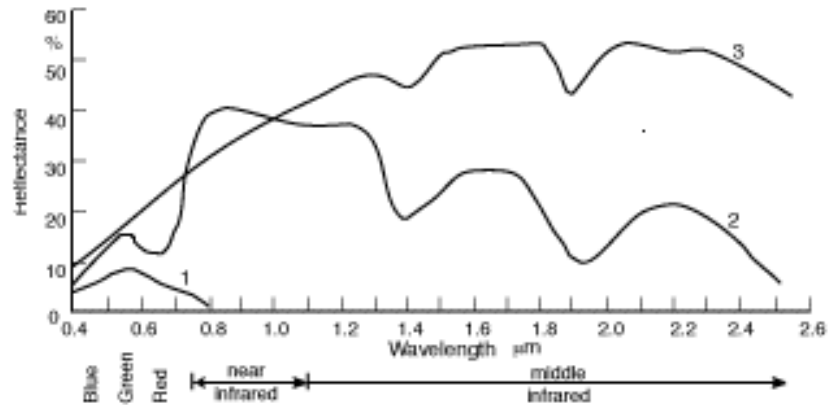


Abb. 4: Reflexionskurven verschiedener Oberflächenmaterialien (1: Wasser, 2: Vegetation, 3: Boden (www.saic.com/publications/techtrends/west.html)).

6.1 Reflexions- und Absorptionseigenschaften von Böden

Dieses Kapitel dient der Verdeutlichung der komplexen Wechselwirkungen und Beziehungen, welche die Reflexion und Absorption von Böden beeinflussen können. Hierzu haben verschiedene Forscher Ergebnisse erarbeitet, die nach einer intensiven Literaturrecherche in diesem Abschnitt komprimiert dargestellt werden sollen. Auf den in diesem Kapitel erarbeiteten Erkenntnissen über die Reflexionseigenschaften verschiedener Bodenparameter baut die Analyse der Reflexionseigenschaften der Testschläge in Kapitel 8 auf.

Die Forschung nach spektralen Eigenschaften der Böden basiert im Wesentlichen auf der Spektrometrie mit hyperspektralen Sensoren. Die Spektrometrie wird seit ca. 25-30 Jahren verwendet, um verschiedene Bodentypen zu differenzieren. Diese Arbeiten zielten hauptsächlich darauf ab, Bereiche im elektromagnetischen Spektrum zu identifizieren, die sensibel auf unterschiedliche Bodeneigenschaften reagieren und so eine Differenzierung unterschiedlicher Bodentypen ermöglichen (COLEMAN 1995). In verschiedenen Ergebnissen wurde seitdem gezeigt, daß es möglich ist, Böden mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften über ihr spektrales Reflexionsvermögen zu klassifizieren. CONDIT (1970) und STONER und BAUMGARDNER (1981) gelang es, verschiedene Bodenformen, vornehmlich in den USA, in einige hauptsächlich vorkommende Basis-Reflexionskurven einzuordnen, von denen immer eine auf den jeweils untersuchten Bodentyp

zutreffen soll. Die Unterscheidungsmerkmale der von STONER ET AL. (1981) vorgestellten Basis-Reflexionskurven (*Abb.: 5*) beruhen hauptsächlich auf den Absorptionscharakteristika der im Boden enthaltenen Eisenoxide und organischen Substanz.

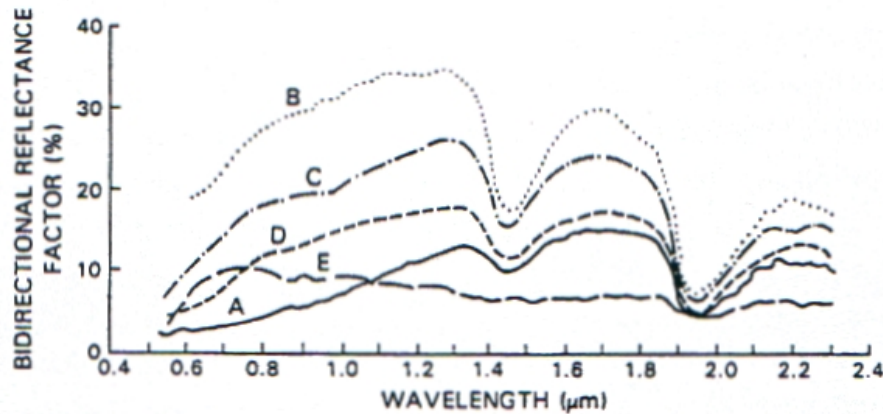


Abb. 5: Charakteristische Bodenreflexionskurven (STONER und BAUMGARDNER 1981). A. entwickelte Böden mit feiner Textur und hohem organischen Anteil ($> 2\%$), B: unentwickelte Böden mit geringem organischen Anteil ($< 2\%$) und geringem Eisenoxidgehalt ($< 1\%$), C: entwickelte Böden mit geringem organischen Anteil ($< 2\%$) und mittlerem Eisenoxidgehalt ($1 - 4\%$), D: Böden mittlerer Textur mit hohem organischen Anteil ($> 2\%$) und geringem Eisenoxidgehalt ($< 1\%$), E: Böden feiner Textur mit hohem Eisenoxidgehalt ($> 4\%$).

Obwohl CONDIT (1970) nach seinen Untersuchungsergebnissen davon ausgeht, daß sich die charakteristischen Spektraldaten der meisten Bodentypen schon durch die Aufnahme von fünf Spektralbereichen voraussagen lassen, gab es in der Folgezeit immer mehr Forderungen und Bestrebungen, spektral hochauflösende Spektrometer zu verwenden, um die Bodeneigenschaften festzustellen. Der Nachteil der hyperspektralen Aufnahmen liegt PRICE (1990) zufolge in der riesigen anfallenden Datenmenge, den daraus resultierenden sehr langen Rechenzeiten und der schwierigen Durchführbarkeit von gängigen Methoden der Spektralanalyse, wie z. B. der Hauptkomponententransformation. In den erfaßten Daten liegt des weiteren ein hoher Anteil an redundanter Information vor. Die Studie von PRICE (1990) bestätigt im Grunde genommen die Annahme von CONDIT (1970). PRICE (1990) hält es für ausreichend, Messungen in vier breiten spektralen Bändern ($0.63-0.74\ \mu\text{m}$; $0.93-1.13\ \mu\text{m}$; $1.61-1.8\ \mu\text{m}$ und $2.03-2.31\ \mu\text{m}$) durchzuführen, um die Reflexionsspektren der betrachteten Böden zu beschreiben.

Die Bodenoberflächen reflektieren im sichtbaren Spektrum ($0.4-0.7\ \mu\text{m}$) generell schwach. Die Reflexionskurven von vegetationslosen Bodenoberflächen steigen allgemein im visuellen

(VIS) und im nahen infraroten Spektrum (0.4-1.0 μm) kontinuierlich schwach an (HOFFER 1978), wobei der Anstieg mit zunehmender Wellenlänge abnimmt. Im Spektralbereich zwischen 1.3 und 2.5 μm fällt die Reflexionskurve ab und zeigt deutliche Minima an den Stellen der Wasserabsorptionsbanden (*Kap.: 6.2.1.2*). Es besteht demnach eine positive Korrelation zwischen der Wellenlänge und der Bodenreflexionsintensität in dem Spektrum von 0.4-1.3 μm , die je nach Bodentyp variiert. Bei dunkleren Böden, wie z. B. den Schwarzerden, liegt eine offensichtlich lineare Beziehung vor. Helle Bodentypen dagegen zeigen einen eher parabolischen Verlauf der Reflexionskurve (CURRAN ET AL. 1990).

SCHRÖDER (1989) schreibt, daß im VIS und im NIR nicht von stark ausgeprägten Reflexionsmustern (Reflexionsmaxima und Absorptionsbanden) auszugehen ist. In den Bereichen längerer Wellenlängen treten dagegen teilweise stark ausgeprägte, charakteristische Muster auf, die durch einen bestimmten Bodenparameter hervorgerufen werden. Diese spezifischen Reflexionsmuster einiger Bodenbestandteile lassen sich in bestimmten Regionen des elektromagnetischen Spektrums feststellen und in den Reflexionskurven der Böden wiederfinden und deuten. Die Lage dieser charakteristischen Reflexionsmuster ist immer relativ konstant (VAN DER MEER ET AL. 1995). Am ausgeprägtesten sind die Spektralcharakteristika der Böden in den Teilspektren des ROT, des NIR und des MIR. Hier lassen sich quantitative und qualitative Unterschiede der Spektraldaten am ehesten für die Erfassung und Abgrenzung von Bereichen unterschiedlicher Böden bzw. Bodeneigenschaften nutzen (KRONBERG 1985). Bodeneigenschaften, die keine spektralen Muster aufweisen, lassen sich teilweise durch vorhandene, spezifische Korrelationen verschiedener Bodenparameter ermitteln. So besteht z. B. eine Korrelation zwischen Bodenfeuchtigkeit und Humusgehalt, bzw. Tongehalt eines Bodens, so daß bei der Kenntnis über ein Parameter Rückschlüsse auf das andere gezogen werden können.

Neben den Eisenoxiden (*Kap.: 6.1.1.2*) und der organischen Substanz (*Kap.: 6.1.1.1*), die vornehmlich die Bodenfarbe beeinflussen, haben auch andere Parameter Einfluß auf das Reflexionsverhalten der Böden. Untersuchungsergebnisse von BOWERS und HANKS (1965), sowie OBUCHOV UND ORLOV (1964) zeigten, daß die Korngröße der Bodenminerale bzw. -partikel und deren räumliche Verteilung im Oberboden ebenfalls Auswirkungen auf das Spektralverhalten haben (*Kap.: 6.1.1.4*). Des weiteren bestehen zwischen diesen Parametern und dem Mineralbestand, sowie der Oberflächenstruktur (*Kap.: 6.1.2.2*) enge Beziehungen,

wobei die beiden zuletzt genannten ebenfalls entscheidenden Einfluß auf die Intensität der Reflexion haben (KRONBERG 1985).

Die Reflexionsintensität einer Bodenfläche ist insbesondere mit der Bodenfarbe bzw. der Helligkeit der Oberfläche (oder Albedo) verbunden, die wiederum vor allem von dem CaCO_3 -Gehalt (Kap.: 6.1.1.3), dem Vorhandensein von organischer Substanz (Kap.: 6.1.1.1) und Eisenoxiden (Kap.: 6.1.1.2) sowie der Bodenfeuchtigkeit (Kap.: 6.1.2.1) beeinflusst wird (BEN-DOR ET AL. 1995). Durch Ansprache der Bodenfarbe ist es möglich, Aussagen über Bodenfeuchte/Wasserhaushalt, Redox-Bedingungen und Zusammensetzung von organischer Substanz und Mineralkörper zu machen (GEOSCAN 1995). Bei der Bodenuntersuchung auf dem Feld wird die Bodenfarbe standardmäßig mit Hilfe der *Munsell Soil Color Chart* (MUNSELL COLOR, 1975) erhoben. Die RGB-Koordinaten der digitalen Fernerkundungsdaten des VIS-Bereichs, haben eine direkte physikalische Aussage, da sie die jeweiligen Farbanteile an der Bodenfarbe repräsentieren. Verschiedene Wissenschaftler haben die Beziehungen der Bodenfarbe und der Reflexionswerte in den einzelnen Kanälen untersucht. ESCADAFALL (1989) gelang es, die Munsellwerte Hue, Chroma und Value mit verschiedenen Kanalkombinationen des Landsat-MSS in Verbindung zusetzen. Zudem war es möglich eine Umrechnungstabelle für RGB-Werte in Munsell-Farben zu entwickeln. Diese Erkenntnis macht es möglich, die Bodenfarbe auf gleiche Art und Weise anzusprechen, wie es unter Bodenkundlern üblich ist. Auch die in der Bodenfarbe enthaltenen Informationen über die Bodeneigenschaften lassen sich so gewinnen.

Die laboranalytisch quantifizierbaren, remissionswirksamen Bodenparameter lassen sich in materialabhängige (Mineralbestand, Humusgehalt, Körnung, Eisengehalt, Kalkgehalt) und materialunabhängige Komponenten (Bodenfeuchte, Oberflächenstruktur) unterteilen (Abb.: 6). Im Folgenden werden die spektralen Eigenschaften der verschiedenen Bodenparameter analysiert, wobei auf die Ergebnisse verschiedener Forschungen zurückgegriffen wird. Auf die oben erwähnte Bodenfarbe wird dabei nicht weiter eingegangen, da sie sich aus den verschiedenen Bodenparametern ergibt.

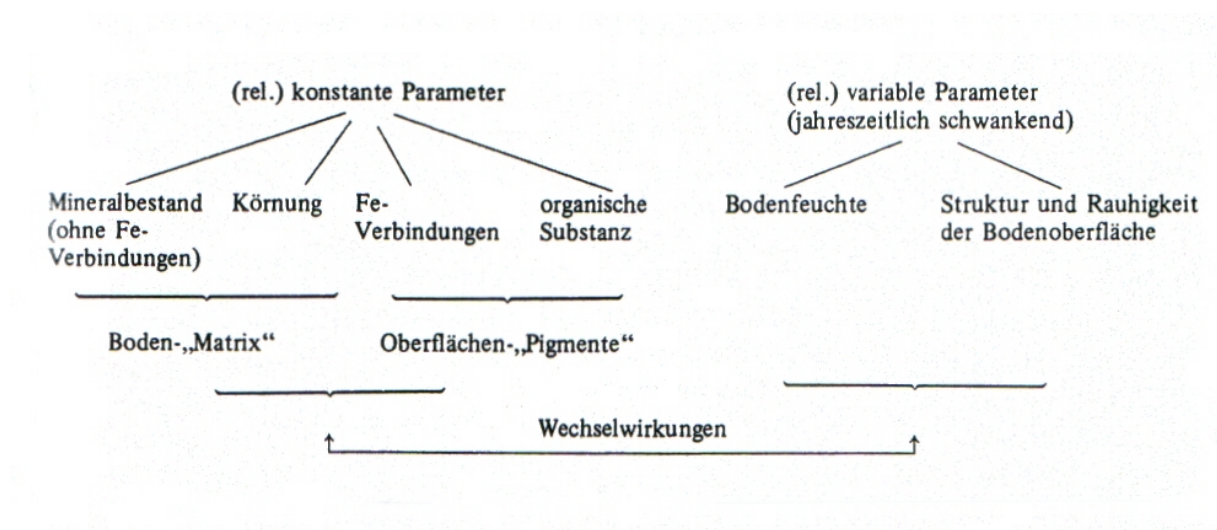


Abb. 6: Einteilung der reflexionswirksamen Bodenparameter (aus KRONBERG 1985).

6.1.1 Konstante Parameter

Unter konstanten Bodenparametern werden materialabhängige Eigenschaften des Bodens verstanden, die über längere Zeiträume keinen gravierenden Veränderungen unterliegen. Ihre Reflexionswirksamkeit ist deshalb ebenfalls als konstant anzusehen. Unterschiedliche Gehalte an verschiedenen Bodeneinhaltsstoffen zeigen teilweise eine deutlich unterschiedliche Beeinflussung der Reflexion des Oberbodens. Diese Reflexionsunterschiede können zur Lokalisierung und Quantifizierung der einzelnen Stoffe herangezogen werden und sind in den folgenden Punkten dargestellt.

Auch diese als konstant bezeichneten Bodenparameter können während eines langen Zeitraums einer Modifikation unterliegen. So können z. B. durch langfristige Erosionsprozesse und Ausspülungen die Inhaltsstoffe im Oberboden verändert werden. Dies gilt insbesondere für den Humusgehalt (*Kap.: 6.1.1.1*) und den Carbonatgehalt (*Kap.: 6.1.1.3*). Diese Veränderung der Inhaltsstoffkombinationen an der Bodenoberfläche zieht eine Veränderung der Reflexionseigenschaften nach sich, die für die Lokalisierung von Erosionsprozessen herangezogen werden können (SCHRÖDER 1992).

6.1.1.1 Humusgehalt

Insbesondere die oberste Bodenschicht (Ap-Horizont), die von den Sensoren erfasst werden kann, steht in enger Abhängigkeit zum Humusgehalt. Schon ein Humusanteil von 1 % führt

zu einer Minderung der spektralen Reflexion (Abb.: 7). Ein Humusanteil von $> 2\%$ im Oberboden stellt nach STONER und BAUMGARDNER (1981) die kritische Einflußgrenze auf die Bodenreflexion dar, der andere Bodenfaktoren remissionsunwirksam werden läßt. Unterhalb dieses Wertes dagegen treten die Eigenschaften der bodenbildenden Substrate (wie Löß, Kalkstein oder Mergel usw.) und der pedogenen Eisenoxide deutlich hervor und bestimmen die spektrale Charakteristik des Bodens. Der Humusgehalt hat aufgrund seiner großen Absorptionsfähigkeit insgesamt einen außerordentlich starken Einfluß auf das spektrale Reflexionsverhalten von Bodenoberflächen (SCHRÖDER 1989). In Abbildung 7 ist die Abhängigkeit der Reflexionsintensität vom Gehalt an organischer Substanz dargestellt.

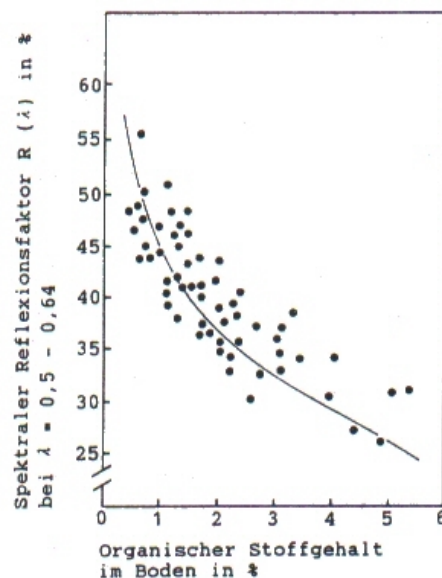


Abb. 7: Abhängigkeit der Bodenreflexion vom Gehalt organischer Substanz (PAGE 1974, aus KRONBERG 1985).

Die Einflüsse der organischen Substanz auf das spektrale Abbildungsverhalten des Bodens haben ihre intensivsten Auswirkungen in dem sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. MULDER (1987) geht jedoch von einer Dämpfung der Reflexionsintensität über das gesamte Spektrum von $0,4\text{--}2,5\text{ }\mu\text{m}$ aus.

Ein hoher Anteil an organischer Substanz im Oberboden zeigt eine stark absorbierende Wirkung und bedingt, durch eine schwache Reflexion im VIS (McKEAGUE 1971 nach BENDOR ET AL. 1972), eine dunklere Färbung. Weitere Studien u. a. von BAUMGARDNER ET AL. (1970) sowie COLEMAN und MONTGOMERY (1987) haben nachgewiesen, daß sich die negative

Korrelation des Humusgehaltes mit der Reflexionsintensität bis in den MIR-Bereich hinein erstreckt. KRISHNAN (1980) hält nach seinen Untersuchungen jedoch das sichtbare Spektrum (VIS) zur quantitativen Bestimmung des Humusgehaltes für besser geeignet als den infraroten Bereich.

Die Charakteristik der Reflexionskurven von humusarmen und humusreichen Böden unterscheidet sich deutlich in ihrem Verlauf. Nach STONER ET AL. (1980) zeichnen sich humusarme Böden durch einen konvexen Verlauf ihrer Reflexionskurve in dem Bereich von 0.5-1.3 μm aus, wogegen ein humusreicher Boden in diesem Bereich eher einen konkaven Kurvenverlauf beschreibt.

Einen quantitativen Nachweis für die Abhängigkeit der Bodenreflexion von dem Gehalt an organischer Substanz im sichtbaren Spektralbereich lieferte PAGE (1974). Er stellte fest, daß es bei einem Anteil an organischer Substanz von $> 5\%$ nicht mehr möglich ist, quantitative Unterschiede, bzw. geringe Veränderungen im Gehalt zu messen. Weiter kommt er zu dem Ergebnis, daß die Reflexion bei sandigen Böden den Humusgehalt um 1% überbewertet und bei feinen Böden, die von Natur aus einen relativ hohen Anteil an organischer Substanz haben, um 1% unterbewertet (nach COLEMAN 1993). Nach Untersuchungen von MINNUS (1967) wirkt sich ein steigender Humusanteil bei Böden verschiedenartiger mineralischer Zusammensetzung unterschiedlich stark auf die Reflexionsminderung aus.

AL-ABBAS ET AL. (1972) vermuten nach ihren Forschungen einen positiven Zusammenhang zwischen dem Gehalt an organischer Substanz und dem Tongehalt, was von STONER und BAUMGARDNER (1981) bestätigt wird.

Organische Substanz ist eine wichtige Komponente von Ackerböden, die in starker positiver Verbindung mit der Bodenfeuchtigkeit, mikrobieller Aktivität und den physikalischen und chemischen Eigenschaften steht. Für die Landwirte ist es daher essentiell, die Mengen an organischer Substanz in ihren Schlägen zu bestimmen, um die Nutzungsmöglichkeiten und den Arbeitsaufwand abschätzen zu können. Diese Bestimmung ist sehr zeitaufwendig und kostenintensiv, insbesondere dann, wenn die Schläge starke räumliche Heterogenitäten aufweisen. Studien von z. B. BAUMGARDNER ET AL. (1985), HENDERSON ET AL. (1989) und FRAZIER ET AL. (1989) haben gezeigt, daß die Oberflächenreflexion, die mit dem Thematic Mapper aufgenommen wird, eine potentiell gute und effiziente Methode darstellt, den Gehalt

an organischer Substanz abzuschätzen. Obwohl es keine schmalen Absorptionsbanden durch die vorhandene organische Substanz gibt, wie es bei anderen Bodenbestandteilen (Eisenoxide, Tonminerale) zum Teil der Fall ist, beinhaltet die gesamte Reflexion des Bodens über den Spektralbereich von 0.52-2.32 μm identifizierende Information über den Humusgehalt (HENDERSON ET AL. 1989). Insbesondere die Spektralbereiche des ROT und des NIR werden für die Abgrenzung unterschiedlicher Humusgehalte als besonders gut geeignet angesehen (MONTGOMERY ET AL. 1987, FRAZIER ET AL 1989 und LEONE ET AL. 1995).

6.1.1.2 Eisengehalt

Der Zusammenhang zwischen dem Eisengehalt und der Bodenfarbe, bzw. der Beeinflussung der Reflexionsintensität des Bodens, ist um einiges komplexer als der des Humusgehaltes und der Bodenreflexion. Dies liegt insbesondere daran, daß eine Menge verschiedener, eisenhaltiger Komponenten im Boden existiert. Die Eisenoxide haben sehr variable Absorptionsbanden, da sie je nach kristalliner Struktur, in der sie eingebaut sind, in einem anderen Wellenlängenbereich ihre absorbierende Wirkung entfalten (HUNT 1980). Nach SCHRÖDER (1989) lassen sich z.T. überlagernde und aufhebende Wirkungen der verschiedenen Eisenoxide nachweisen, die eine genaue Aussage zu der Art der Reflexionsbeeinflussung enorm erschweren. Welchen großen Einfluß Eisenoxide im Oberboden auf die Reflexionsintensität haben können zeigt die Aussage von HOFFER (1978), der davon ausgeht, daß Unterschiede bis zu 40 % hervorgerufen werden können.

Diese vielfältigen Erscheinungsformen machen es sehr schwierig, die Literatur im Hinblick auf den Einfluß von Eisenoxid auf die Bodenreflexion auszuwerten. SCHRÖDER (1988) weist darauf hin, daß die pedogenen (amorph bis kristallin) Eisenoxide bisher noch nicht ausreichend erforscht sind, um deren Reflexionswirksamkeit mit Sicherheit interpretieren zu können. MULDER (1987) nennt in diesem Zusammenhang die Wellenlängenbereiche bei 1.1 μm und 0.87 μm mit einem hohen Informationspotential über den Eisenoxidgehalt. VAN DER MEER ET AL (1995) weisen auf charakteristische Absorptionsbanden des Eisens nahe 1.0 μm , 0.55 μm und 0.46 μm hin. Nach SCHRÖDER (1989) ist es gerechtfertigt, den Gehalt an verschiedenen Eisenoxiden und den Eisengehalt für Remissionsquantifizierungen zu einem Gesamteisengehalt zusammenzufassen, da ihre Gehalte eng miteinander korrelieren.

Das Gesamteisenoxid ist bei Humusgehalten kleiner 1,5 % remissionswirksam (MONTGOMERY 1976) und führt zu einer Dämpfung der spektralen Reflexion im kurzwelligen sichtbaren Bereich (VAN DER MEER 1995, SCHWERTMANN 1988). Für den Bereich von 0.5 - 0.64 μm haben OBUCHOV und ORLOV (1964) die Beziehung quantifiziert und eine Antiproportionalität nachgewiesen, d.h. ein steigender Eisenoxidgehalt führt zu einer Verringerung der Reflexionsintensität. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 8 grafisch dargestellt. MULDER (1987) schreibt, daß insbesondere ein Fe-reicher Oberboden typischerweise im kurzwelligen sichtbaren Bereich nur eine sehr geringe Reflexion aufweist, die ab 0.53 μm stark ansteigt. Diese Aussage wird auch von KRONBERG (1985) bestätigt. Er schreibt, daß der Anstieg des Fe-Gehalts im Oberboden zu einer Verminderung der Reflexion im kurzwelligen Bereich des VIS und zu einem Anstieg der Reflexionsintensität im langwelligen VIS und im NIR führt. Die Reflexionskurve eisenhaltiger Böden zeigt im allgemeinen einen Anstieg bis in den infraroten Bereich hinein, wobei das Maximum der Reflexionsintensität in der Region um 1.3 - 1.6 μm erreicht wird (GUPTA 1991).

Der sichtbare und infrarote Bereich beinhaltet nach HILL (1994) viel Information über die Existenz von Eisenoxiden in der Bodenoberfläche, so daß quantitative Aussagen getroffen werden können. WEVER (1989) und MONTGOMERY ET AL. (1987) weisen in ihren Arbeiten auf eine eisenoxidbedingte Reflexionsbeeinflussung im roten Wellenlängenspektrum hin.

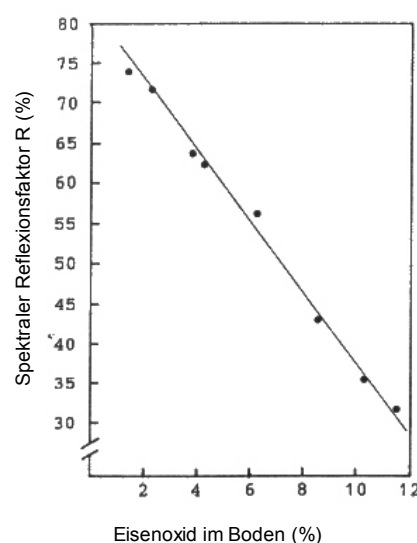


Abb. 8: Abhängigkeit der Bodenreflexion vom Eisenoxidgehalt im Spektralbereich von 0.5-0.64 μm (aus HOFFER 1978).

Trotz deutlicher Unterschiede in der Reflexionsintensität verschiedener Bodenareale läßt sich aber keine gesicherte Aussage über den Fe-Gehalt des jeweiligen Oberbodens machen (WEVER 1989). STONER und BAUMGARDENER (1980) dagegen favorisieren den Bereich des mittleren infraroten Spektrums, um Flächen aufgrund quantitativer Unterschiede im Fe-Gehalt räumlich von einander abzugrenzen.

VAN DER MEER ET AL. (1995) stellten Untersuchungen über die gegenseitige Beeinflussung der Reflexionswirksamkeit von Eisenoxiden und Carbonatgehalt an. Sie kamen zu dem Ergebnis, daß die Absorptionsmuster des Eisenoxids nicht durch die Menge an Carbonat im Boden beeinflußt werden.

6.1.1.3 Kalkgehalt

Hellen Bodenoberflächen wird in der Regel ein hoher Gehalt an Calciumcarbonat oder Sand (*Kap. 6.1.1.4*) zugeordnet. Dies ist auf die hohe Reflexion im VIS-Bereich des elektromagnetischen Spektrums zurückzuführen. Je höher der Gehalt an CaCO_3 ist, desto intensiver reflektiert ein Boden. Es besteht demnach eine positive Korrelation zwischen CaCO_3 -Gehalt und Reflexionsintensität (BAUER 1979 nach BEN-DOR UND BANIN 1995). Da Calciumcarbonat keine signifikanten Absorptionsbanden oder sonstige spektrale Muster in der VIS-Region hat, gehen BEN-DOR ET AL. (1995) davon aus, daß der Carbonatgehalt nur über die Albedo des Bodens zu bestimmen ist. MULDER (1987) zufolge liegt bei der Wellenlänge $2.35 \mu\text{m}$ eine Absorptionsbande vor, die dem Carbonat zugeordnet wird.

Nach SCHRÖDER (1989) kann für einen Oberboden, in dem reflexionsmindernde Bodenparameter wie Humus oder Eisenoxid enthalten sind, eine Untergrenze des Carbonatgehaltes von 10 % festgelegt werden, unter der keine Reflexionswirksamkeit mehr von dem Calciumcarbonat ausgeht. Bei einem Gehalt ab 25 % ist von einer dominierenden, die Einflüsse der anderen Bodenparameter einschränkenden, Remissionswirksamkeit auszugehen (SCHRÖDER 1989).

Bei den landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands spielt der Kalkgehalt im Oberboden des Standortes eher eine untergeordnete Rolle, da die meisten Ackerflächen oberflächlich entkalkt sind. Er wird deshalb bei der spektralanalytischen Bearbeitung häufig außer acht gelassen. Für die Lokalisierung erodierter Flächen mittels Fernerkundung stellt der CaCO_3 -

Gehalt des Oberbodens jedoch einen bedeutsamen Indikator dar. Auf erodierten Flächen tritt das carbonathaltige geologische Ausgangsgestein häufig an die Oberfläche und beeinflusst die Reflexion des Oberbodens. Als erfolgreiche Studien sind in diesem Zusammenhang BRIXY (1997) und LEONE ET AL. (1995) zu nennen.

6.1.1.4 Bodentextur

Neben den verschiedenen bodenchemischen Faktoren hat auch die Bodentextur, als bodenphysikalischer Faktor, Einfluß auf das Reflexionsvermögen des Ap-Horizontes. BOWERS und HANKS (1965) sowie ORLOV (1966) stellten fest, daß eine feinere (glattere) Bodentextur die einfallende Strahlung besser reflektiert, als grobkörnigere (rauhere) Texturen. Nach BAUER ET AL. (1985) nimmt die Reflexionsintensität mit zunehmender Partikelgröße der Kornfraktion exponentiell ab. Dies gilt für den gesamten Wellenlängenbereich von 0.4 µm bis 1.0 µm (GLASER 1989).

Der Vergleich von Labor und Geländedaten ist kritisch zu betrachten. Untersuchungen von MYERS ET AL. (1975) zeigten, daß sandige Böden im Gelände eine stärkere Reflexion aufweisen als tonige Böden. Dieses Ergebnis widerspricht den Laborergebnissen. Es ist darauf zurückzuführen, daß im Gelände die Oberfläche der Sandböden im Vergleich zur Oberflächenstruktur ausgetrockneter Lehm- und Tonböden glatter und ebener ist (vgl. Oberflächenrauigkeit). Im Labor werden die Bodenproben getrocknet und geglättet, wodurch die natürlichen Gegebenheiten verfälscht werden.

6.1.1.5 Mineralbestand/Tongehalt

Bei nahezu reinem, trockenem, mineralischem Substrat wird die Reflexion der Bodenfläche qualitativ von den Spektralen Reflexionseigenschaften der beteiligten Mineralien bestimmt (HILDEBRANDT 1996). Die Minerale haben dabei ein artspezifisches Reflexionsverhalten, das durch die jeweiligen Absorptionsbanden verursacht wird.

Die verschiedenen Minerale haben sehr variierende Absorptionsbanden, die sich je nach angelagerten Ionen verändern. Die Absorptionsbanden der verschiedenen Minerale beruhen hauptsächlich auf den Fe- und OH-Anteilen (MULDERS 1987), wobei die Stärke der Ausbildung dieser Muster von der Fähigkeit, Wasser aufzunehmen, abhängt. Die OH-Absorption zeigt sich am deutlichsten im Bereich des MIR. Aus diesem Grund favorisieren

BEN-DOR ET AL. (1995) den Landsat Kanal TM-7 für die Lokalisierung von Tonmineralien. Nach MATHEWS ET AL. (1973) beeinflussen die Tonminerale den Kurvenverlauf der Reflexionsintensität des Oberbodens über den gesamten spektralen Bereich von 0.5-2.6 μm .

Die vielfältigen, auf der Erde vorkommenden Minerale, wurden von HUNT & SALISBURY & LEHNHOFF (1971-1973) hinsichtlich ihres Reflexionsverhaltens laboranalytisch untersucht. Die Ergebnisse sind bei MULDER (1987) zusammengefaßt dargestellt und können dort nachgelesen werden. Die große Zahl vorkommender Minerale und die Variationsbreite möglicher spektraler Reflexionskurven zeigt, wie vielfältig der Einfluß auf die Bodenreflexion sein kann. Als grundlegende Feststellung dieser Untersuchungen läßt sich festhalten, daß eine spektrale Trennung einzelner Minerale möglich ist. Insbesondere im Bereich des mittleren Infrarot (MIR) zeigen die meisten Minerale charakteristische Reflexionsmuster. In dem MIR 2.08-2.35 μm bewirken viele Tonminerale eine Absorption aufgrund der schmalen Hydroxyl-Banden, die aus der Wassereinlagerung resultieren. Nach GÖTTING (1982) zeigen insbesondere AlOH und MgOH führende Schichtsilikate stark ausgeprägte Absorptionsbanden in charakteristischen Teilspektren des Lichts.

Diese Absorptionsbanden haben jedoch in der Regel eine so geringe Ausdehnung, so daß es schwierig ist, diese mit den spektral gering auflösenden Satellitenfernerkundungssystemen zu lokalisieren. KIEREIN-YOUNG ET AL. (1989) sind der Auffassung, daß ein Breitband-Fernerkundungssystem, wie der Landsat-TM, die beinhaltete Information „undersampled“, d. h. die Messungen der Reflexion finden nicht in einer hinreichenden Dichte statt, um das Reflexionssignal genau nachvollziehen zu können. Eine Identifikation verschiedener Minerale in den spektralen Daten des Landsat-TM erscheint ihnen daher nicht möglich. Dies spricht für die Verwendung hyperspektraler Fernerkundungsdaten (vgl. Kap.: 5.3.1.1) im Rahmen der spektralen Lokalisierung einzelner Minerale.

Einige Minerale haben allerdings eine so intensive Reflexionswirksamkeit, daß ihre schmalen Muster trotzdem in Landsat-TM Aufnahmen erkannt werden können. HILL (1994) nennt z. B. Calcit (2.34 μm) und Dolomit (2.32 μm), die sehr starke Absorptionsmuster verursachen. Untersuchungen von RAMSAMY (1993) haben gezeigt, daß eine Unterscheidung verschiedener Minerale mit verschiedenen Sensoren (TM, SPOT, IRS) durchaus möglich ist. Eine gezielte Lokalisierung bestimmter Minerale erscheint jedoch unwahrscheinlich, da ihre Absorptionsmuster eng beieinander liegen und sehr schmale spektrale Bereiche umfassen. In

einem Aufnahmekanal liegen daher in der Regel Absorptionsbanden verschiedener Minerale. Vielmehr läßt sich eher eine allgemeine Aussage über den relativen Tonmineralanteil im Boden machen. Die Reflexionsintensität eines Bodens mit einem hohen Tonmineralanteil fällt im MIR-Bereich ab (BEN-DOR ET AL. 1995).

6.1.2 Variable Parameter

Neben den relativ konstanten Bodenparametern gibt es auch variable Parameter, die das Reflexionssignal eines Oberbodens beeinflussen. Sie stellen Bodeneigenschaften dar, die sich in kurzen Zeiträumen verändern können und deren Reflexionswirksamkeit sich mit dieser Veränderung ebenfalls anders darstellt. Die im folgenden behandelten Parameter sind die Bodenfeuchte, die kurzzeitigen Veränderungen unterliegt, und die Oberflächenrauigkeit, deren Veränderungen anthropogen und eher jahreszeitlich bedingt sind.

6.1.2.1 Bodenfeuchte

Der Einfluß des Feuchtigkeitsgehalts eines Bodens auf das spektrale Signal wurde von BOWERS UND HANKS (1965) untersucht. Sie zeigten, daß mit einem Anstieg des Feuchtigkeitsgehaltes im Boden die Reflexion über die gesamte spektrale Bandbreite von 0.5-2.5 μm gedämpft wird und die ausgebildeten Absorptionsbanden bei 1.4 μm und 1.9 μm um so stärker ausgeprägt sind (tiefer und breiter), je höher der Gehalt an Feuchtigkeit im Boden ist (Abb.: 9). Die Dämpfung der Reflexionsintensität durch zunehmende Feuchtigkeit der oberen Bodenschicht findet bei jedem Boden statt (HILDEBRANDT 1996). Auch STONER UND BAUMGARDNER (1980) bestätigen in ihren Forschungen diese Intensitätsdämpfung der Reflexion. In diesem Zusammenhang stellen FRAZIER ET AL. (1989) die Vermutung auf, daß, wenn die Feuchtigkeit wie ein multiplikativer Faktor auf das spektrale Signal wirkt, ihr Einfluß durch die Verwendung eines Ratios, während der digitalen Bildverarbeitung eliminiert werden kann. Dabei ist allerdings zu beachten, daß nicht bei allen von STONER UND BAUMGARDNER (1980) untersuchten Böden der multiplikative Einfluß festzustellen war.

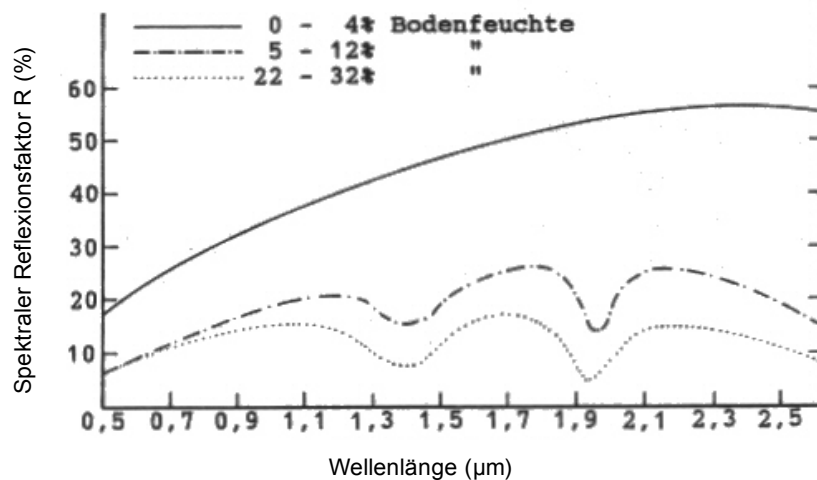


Abb. 9: Spektrale Reflexionskurven von Sandböden mit unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt (HOFFER 1978).

Die Feuchtigkeit im Boden senkt vermutlich den Anteil an diffus reflektierter Strahlung, wodurch weniger Licht in den Sensor gelangt und die Böden dunkler erscheinen. Nach SCHRÖDER (1988) kann es bei einem Bodenwassergehalt von $> 22\%$ zu spiegelnder Reflexion kommen, die eine quantitative Bildanalyse verhindern würde.

Untersuchungen von OBUKHOV UND ORLOV (1964) und von PLANET (1970) zur spektralen Abbildung von feuchten Böden zeigten den unterschiedlich starken Einfluß der Feuchtigkeit auf humusreiche bzw. humusarme Böden. Die Reflexionskurve der humusarmen Böden wurde hier weitaus schwächer gedämpft, als die der humusreichen Böden. Diese Aussage wurde auch von SADORNIKOV ET AL. (1978) bestätigt. Nach HILDEBRANDT (1996) wird das Ausmaß der Reflexionsminderung in Abhängigkeit der Bodenfeuchtigkeit an der Oberfläche von der Bodenart, dem Humusgehalt, der Korngrößenstruktur und den mineralischen Bestandteilen bestimmt.

Nach BEDIDI (1991) modifiziert die Bodenfeuchtigkeit die optischen Eigenschaften des Bodens vor allem in den Spektralbereichen des VIS und des NIR, wobei sie ihren größten Einfluß auf die Reflexionskurve im Bereich des Infrarot ausübt (BOWERS und HANKS 1965, sowie CURRAN ET AL. 1990). Feuchte Böden erscheinen im NIR sehr dunkel. Eine starke Dämpfung der Reflexion liegt im Bereich von $1.4\ \mu\text{m}$ und $1.9\ \mu\text{m}$ vor, wo die für Wasser charakteristischen Absorptionsbanden vorliegen (u.a. BAUMGARDNER ET AL. 1985). Diese

Bereiche sind bei feuchten Böden besonders stark ausgeprägt. Im Labor lassen sich diese Absorptionsbanden sehr gut zur Quantifizierung der Wassergehalte in den Böden verwenden. Für diese Quantifizierung mittels Fernerkundungsaufnahmen ergibt sich das Problem, daß genau diese Bereiche mit den Absorptionsbanden des atmosphärischen Wasserstoffs zusammenfallen (KRONBERG 1985), der in diesen Bereichen generell die Strahlung absorbiert. Eine Aussage über die spektralen Eigenschaften des Bodens in diesen spektralen Bereichen muß daher kritisch hinterfragt werden.

MONTGOMERY und COLEMAN (1987) kommen nach ihren Untersuchungen zu dem Ergebnis, daß sich insbesondere der Kanal TM-7 für die Erkennung von Feuchtigkeitsunterschieden eignet. Auch WEVER (1989) kommt in seinen Untersuchungen zu einem ähnlichen Ergebnis. Er hält den Aufnahmebereich des TM-5 für am besten geeignet, um differierende Bodenfeuchtigkeitsgehalte aufzuzeigen. Beide Kanäle liegen im mittleren Infrarotbereich des Wellenlängenspektrums, der demnach ein hohes Informationspotential über die Bodenfeuchtigkeit besitzt. Das Reflexionsverhalten eines Bodens ist im allgemeinen in den beiden Kanälen recht ähnlich, wobei die Intensität in TM-7 insgesamt auf einem geringeren Niveau liegt (WEVER 1989).

Die Bodenfeuchte wird vor allem durch die Witterungsverhältnisse bestimmt. Bei landwirtschaftlichen Böden kann auch der Bearbeitungszustand (pflügen, eggen) zu einer Variation der Bodenfeuchte im Oberboden (Ap-Horizont) führen. Bei der Interpretation von Fernerkundungsaufzeichnungen ist zu beachten, daß schon die Austrocknung einer relativ dünnen Oberschicht reflexionsfördernd wirkt. Die wenige Zentimeter tiefer liegenden Bodenschichten können dagegen noch frisch sein. Schlußfolgerungen auf die für Pflanzen verfügbare Bodenfeuchtigkeit müssen daher mit Bedacht und bodenkundlichem Sachverstand gezogen werden.

6.1.2.2 Oberflächenrauigkeit und Bodenbearbeitung

Glatte Oberflächen, die meistens aus feinem Material bestehen, haben in der Regel eine höhere Reflexionsintensität als Oberflächen aus groben Partikeln, da diese häufig eine rauhe Oberfläche bilden (KRONBERG 1985). Dieser Einfluß gilt sowohl für die sichtbaren, als auch für den infraroten Spektralbereich (WINTER 1980). Diese Feststellung ist besonders bei landwirtschaftlich genutzten Böden von Bedeutung, deren Oberflächenstruktur sich je nach

Bearbeitungsstand und Jahreszeit ändert. Bei gerade frisch bearbeiteten Feldschlägen kommt noch unterstützend hinzu, daß die frisch aufgebrochenen Schollen in der Regel eine höhere Feuchtigkeit an der Basis besitzen, was die erhöhte Absorption positiv unterstützt (*Kap.: 6.1.2.1*).

Die feinkörnigen Böden der tonigen und lehmigen Fraktion, wie sie im Untersuchungsgebiet dominieren, haben die Eigenschaft, nach einer längeren Trockenperiode Austrocknungsstrukturen zu bilden. Diese zeigen sich in großen, verklumpten Aggregaten und Rißbildungen an der verkrusteten Oberfläche. Für diesen Fall gilt nicht mehr die oben erwähnte Aussage, daß feinkörnigere Substrate einen höheren Reflexionsgrad haben. Untersuchungen von DAMEN (1975, nach MULDER 1987) über die Reflexionsbeeinflussung von Bodenaggregaten zeigten, eine Abnahme der Reflexionsintensität mit der Zunahme der Aggregatgröße. Die Reflexionsdämpfung durch gröbere Strukturen wird auch bei der Betrachtung von groben und feinen Bearbeitungsriden deutlich (DAMEN 1975). Hierbei ist die Änderung der spektralen Reflexion stark von der Richtung der einfallenden Strahlung und der Beobachtungsrichtung abhängig (BOLLE 1975).

Die rauen Strukturen üben einen entscheidenden Einfluß auf die Reflexions- und Absorptionsprozesse an der Oberfläche aus, da auftretende Mehrfachabsorption zu einer Verminderung des reflektierten Strahlungsanteils führt (KRONBERG 1985). Die Bodenrauigkeit stellt eine wichtige, die direkte Reflexion der Böden beeinflussende, Komponente dar (JAQUEMOND ET AL. 1992). Die physikalischen und mathematischen Grundlagen für die Brechungsvorgänge und die Absorptions- Reflexionsprozesse an der rauen Bodenoberfläche sind bei VINCENT (1997) nachzulesen.

CIERNIEWSKI ET AL. (1983) fanden heraus, daß die Reflexion dunklerer Böden insgesamt einer geringeren Beeinflussung durch die Bodenbearbeitung unterliegt als die der helleren Böden. Diese Feststellung gilt den Untersuchungen zufolge insbesondere für den Bereich von 0.4 - 0.8 μm .

6.2 Reflexions- und Absorptionseigenschaften von Vegetation

Gesunde grüne Vegetation hat eine sehr typische Reflexionskurve (*Abb.: 4*). Die Vegetation hat ein relativ niedriges Reflexionsvermögen im sichtbaren Spektrum, das zum infraroten

Bereich stark ansteigt und über das gesamte Infrarot hoch bleibt. Im MIR nimmt die Reflexionsintensität wieder ab. In diesem Bereich bestehen artspezifische Reflexionscharakteristika (HOLBEN ET AL. 1983, nach GLASER 1989). Die Reflexionskurve ist für Blätter und Nadeln verschiedener Pflanzen nur graduell unterschiedlich. Innerhalb des Reflexionsspektrums gibt es drei verschiedenen Bereiche, in denen das Reflexionsvermögen der vitalen, grünen Pflanze durch unterschiedliche Parameter beeinflusst wird:

- Der sichtbare Spektralbereich zeichnet sich durch geringe Reflexionswerte aus. Diese Absorption ist in erster Linie durch die Blattpigmente (vor allem Chlorophyll) bestimmt. Die Höhe der Absorption ist von der Menge und der Art der Pigmente abhängig und liegt in der Größenordnung von 70-95 % der Einstrahlung (HILDEBRANDT 1996). Die Reflexionskurve zeigt im sichtbaren Spektrum ein deutliches Maximum der Reflexion im gelbgrünen Bereich bei $0.55 \mu\text{m}$, das auf das Reflexionsvermögen des Chlorophylls in diesem Bereich zurückzuführen ist und erklärt, warum Blätter von den menschlichen Augen grün gesehen werden. Die Abhängigkeit der Reflexion vom Pigmentgehalt führt zu einer mehrmaligen Veränderung der Reflexionskurve im Laufe der Vegetationszeit. Eine Änderung des Pigmentgehaltes der Blätter kann auch streßbedingt (z. B. Schwermetallgehalt, Trockenheit) erfolgen und eine Veränderung der Reflexion im sichtbaren Bereich hervorrufen.
- Der Bereich des nahen Infrarots von $0.7\text{-}1.3 \mu\text{m}$ ist bei vitalen Blättern oder Nadeln durch ein breites Reflexionsmaximum gekennzeichnet. Je nach Pflanzenart beträgt die Reflexion in diesem Bereich 30-70 % (HILDEBRANDT 1976), und eine Absorption durch Blattpigmente findet kaum statt. Das hohe Reflexionsvermögen in diesem Spektralbereich liegt in der internen Gewebestruktur bzw. Zellorganisation des Blattes begründet (KRONBERG 1985). Der Aufbau des Blattinneren (Mesophyll) bestimmt die für die Reflexions- und Streuprozesse zur Verfügung stehende Anzahl der Grenzflächen. Steht eine Pflanze durch veränderte Umweltbedingungen unter Wasserstreß, verändert sich die Struktur des Blattgewebes und folglich auch dessen Reflexionseigenschaft. Bei abnehmender Bodenfeuchtigkeit erhöht sich die Reflexion (WEVER 1989) der Biomasse. Bei Vertrocknungs- oder Verwelkungserscheinungen sinkt die Reflexionsintensität wieder ab (HILDEBRANDT 1996).

- Die Reflexion in dem Wellenlängenbereich von 1.3-2.5 μm wird vor allem durch den Wassergehalt der Blätter beeinflusst. Die Werte fallen über den gesamten Bereich diskontinuierlich ab. Je höher der Wassergehalt der Blätter ist, desto niedriger sind die Reflexionswerte über den gesamten Bereich und desto ausgeprägter sind die Wasserabsorptionsbanden bei 1.45 μm und 1.96 μm . Bei der Verringerung des Wassergehaltes steigen die Werte an, und die Reflexionskurve gleicht sich mehr und mehr aus. Symptome gestreßter Vegetation sind in Kanal TM-5 gekennzeichnet und können über diesen leicht festgestellt werden (WEVER 1989).

Insbesondere im Infrarotbereich existieren vielfältige Unterschiede in der Reflexionsintensität zwischen Nadeln und Blättern sowie zwischen gesunden und kranken Blattorganen der gleichen Art. Dieser Spektralbereich kann in der Fernerkundung besonders für die Unterscheidung von Pflanzenarten und für die Lokalisierung von Bestandsschädigungen herangezogen werden. Auch die anderen Spektralbereiche beinhalten ein hohes Informationspotential über den betrachteten Vegetationsbestand.

Aufgrund des charakteristischen Reflexionsverhaltens der grünen Vegetation, vor allem im Bereich des NIR und des MIR, ist es sehr einfach möglich, vegetationsbestandene von vegetationslosen Flächen zu unterscheiden. Für diesen Aspekt wurden spezielle mathematische Algorithmen (*Vegetationsindex*) entwickelt, die in Kapitel 7.4.1 behandelt werden.

Nicht nur die grüne Vegetation hat charakteristische Reflexionseigenschaften und -muster, sondern auch das abgestorbene, vertrocknete, meist bräunlich gefärbte Pflanzenmaterial verfügt über spezifische Reflexions- und Absorptionseigenschaften. Durch Ernterückstände kann das Reflexionssignal landwirtschaftlich genutzter Böden durchaus verzerrt werden. Untersuchungen von ELVIDGE (1990) an trockenem Pflanzenmaterial verschiedener Arten zeigten, daß die spektralen Eigenschaften von Lignin und Zellulose die Reflexionseigenschaft im NIR dominieren und im Bereich von 2.0-2.5 μm artspezifische Reflexionsmuster hervorrufen. ELVIDGE (1990) geht jedoch nicht davon aus, daß diese charakteristischen Absorptionsmuster in den breiten Aufnahmekanälen des Landsat-TM oder des IRS-1C lokalisiert werden können.

6.3 Reflexionseigenschaften von Gewässern

Wasserkörper zeigen im allgemeinen eine geringe Reflexion, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Die Reflexionskurve hat ein Maximum im sichtbaren Spektralbereich, in dem sie nur schwer von Vegetation differenzierbar ist. Mit zunehmender Wellenlänge, zum roten und infraroten Spektralbereich hin, nimmt die Reflexionsintensität sehr schnell ab.

Die Reflexion eines Gewässers kann durch Trübungen, Algengehalt und Wellengang modifiziert werden. Alle drei Faktoren führen in der Regel zu einer Erhöhung der Reflexionswerte.

6.4 Das Problem der Mischsignale

Die Pixel einer Satellitenaufnahme enthalten in der Regel immer Informationen von verschiedenen Objekten mit differenzierten spektralen Eigenschaften. Diese Mischpixel stellen eine Fehlerquelle für die korrekte Klassifizierung dar. Die gemischten Pixel werden auch als „Mixel“ bezeichnet (FRASER ET AL. 1987). Mit Zunahme der geometrischen Auflösung des Sensors nimmt der Anteil an Mischpixeln in der Satellitenszene ab.

Bei der Betrachtung von Feldschlägen bestehen die Mischpixel aus den unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Feldrainen, Feldwegen, Grabenböschungen und benachbarten Fruchtarten innerhalb eines Bildelements. Mit dem Verhältnis zwischen der geometrischen Auflösung des Sensors zur Parzellengröße der aufgenommenen Ackerfläche ist es möglich, Rückschlüsse auf das Verhältnis von Mischpixeln und „reinen“ Pixeln (ANTROP 1985, nach Glaser 1989) zu machen.

Bei der Betrachtung des Bodens hat man immer mit dem Problem der Mischpixel zu tun. Es besteht die Gefahr, daß das spektrale Signal des Bodens von Pflanzenrückständen beeinflusst wird (Kap.: 6.2). Nach SHORT (1982) zeichnet sich ab einer 10 % igen Vegetationsbedeckung die typische spektrale Charakteristik der Vegetation (Kap.: 6.2) in der Aufnahme der Fläche ab. Diesem Problem kann mit einem Vegetationsindex begegnet werden, indem die ausgewiesenen Flächen „ausmaskiert“ werden. Für LEONE ET AL. (1995) stellt ein geringer Grad an Vegetationsbedeckung kein Hindernis für die Bestimmung verschiedener Bodenparameter dar. Aber selbst wenn jegliche Beeinflussung durch die Vegetation ausgeschlossen werden kann, ist das „reine“ Signal des Bodens immer ein Mischsignal. Ein

Pixel von einer unbedeckten Fläche enthält immer spektrale Information von organischer Substanz, von Mineralien und von Feuchtigkeit, d. h. von allen Bodenparametern.

In dem mittleren Infrarotbereich des Landsat-TM können auch Mischpixel existieren, die Information der von der Erde emittierten Wärmestrahlung enthalten. Diese Strahlung hat nichts mit dem betrachteten Objekt zu tun und führt zu einem verfälschten spektralen Abbild.

6.5 Nutzungspotential für die Fernerkundung von Böden

Die unterschiedlichen spektralen Reflexionseigenschaften der Materialien sind die Voraussetzung dafür, daß es überhaupt möglich ist, mittels Fernerkundung Differenzierungen der Erdoberfläche zu machen. Bei der Betrachtung von Böden kommt es vor allem auf die Reflexionseigenschaften der Bodenbestandteile in der obersten Bodenschicht an, da nur diese von den optischen Scannern erfaßt wird. Bei landwirtschaftlich genutzten Böden ist dies der Ap-Horizont, der einem ständigen anthropogenen Bearbeitungsprozeß unterliegt.

Die vielfältigen, sich gegenseitig addierenden oder reduzierenden Wechselwirkungen der unterschiedlichen reflexionswirksamen Bodenparameter, aber auch die manipulierenden äußeren Einflüsse (*Kap.: 5.4*), müssen bei der Auswertung der Fernerkundungsdaten bedacht und berücksichtigt werden. Die Erkennung von unterschiedlichen Reflexionsmustern des Bodens mittels optischer Satellitenfernerkundungssysteme ist in einem begrenzten Rahmen durchaus möglich, doch können nicht so weitreichende Informationen aufgedeckt werden, wie es mit hyperspektralen Sensoren nachgewiesen wurde. Die weitreichenden, meist mit hyperspektralen Spektrometern im Labor identifizierten, Reflexionsunterschiede einzelner Bodenparameter lassen sich häufig nicht mit multispektralen Scannern erfassen, da die Anzahl der Aufnahmekanäle zu gering, oder deren Bandbreite einen zu großen spektralen Bereich abdeckt. Des weiteren muß darauf hingewiesen werden, daß die größtenteils im Labor gewonnen Reflexionsdaten der Böden nicht ohne weiteres als Vergleich für die Auswertung von Satellitendaten herangezogen werden können. Die labortechnische Analyse geht in der Regel von trockenen, glatten Bodenproben aus, was in den seltensten Fällen den Gegebenheiten der Fernerkundungsaufnahme entspricht. Außerdem betrachtet sie nur eine Beleuchtungsrichtung (*Kap.: 5.4.2*) und einen Aufnahmewinkel und wird damit nicht dem Verständnis der Interaktion der Strahlung an der Bodenoberfläche gerecht (JAQUEMOND ET AL.

1992). Die vielfältigen, atmosphärischen Einflüsse auf die elektromagnetische Strahlung bleiben bei Laboruntersuchungen ebenfalls unberücksichtigt (*Kap.: 5.4.1*).

Die beobachtete Reflexion eines Bodens in Satellitenaufnahmen kann sich aus den aufgezeigten Gründen anders darstellen, als sie im Labor ermittelt worden ist. Die Reflexionswerte lassen sich zwar vergleichen, doch sind sie in den Fernerkundungsdaten in der Regel schwächer vorzufinden.

Auch bei gleichen äußeren Gegebenheiten können Böden eines gleichen Typs eine unterschiedliche Reflexion aufweisen. Da ein Bodentyp per Definition eine gewisse Variationsbreite der Oberflächeneigenschaften hat, ist davon auszugehen, daß derselbe Bodentyp auch unterschiedliche Spektralverhalten zeigen kann. KRISTOF und ZACCHARY (1974) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, daß die spektrale Variationsbreite innerhalb eines Bodentyps größer sein kann, als die Unterschiede im Spektralverhalten zweier Bodentypen. Die multispektralanalytische Fernerkundung wird daher Bereiche unterschiedlicher Bodeneigenschaften lokalisieren und abgrenzen können, aber eine Klassifikation nach einem bestimmten Bodentyp wird in der Regel kaum möglich sein (KRONBERG 1985). Dieses kann nur über die gleichzeitig kombinierte Geländeerhebung geleistet werden. Die Geländeerhebung ist ebenfalls notwendig, da die Fernerkundung nur Informationen über die Bodenoberfläche liefert und nicht über das unterliegende Material. Mit der Fernerkundung können spektral homogene Oberflächen abgegrenzt werden, die als Stichprobenflächen für die Geländeerhebung dienen können und den Arbeitsaufwand dort minimieren.

Es ist im allgemeinen schwierig oder gar nicht möglich, die Ergebnisse von Untersuchungen mit Fernerkundungsdaten aus einem Untersuchungsgebiet auf ein anderes Gebiet zu übertragen. Die Gründe dafür liegen u. a. in dem unterschiedlichen Sonnenstand, der Bodenfeuchte und der Oberflächenrauigkeit, durch die das Reflexionssignal unterschiedlich beeinflusst wird, so daß ein identischer Bodentyp ein anderes spektrales Abbild liefert (KRISTOF und ZACCHARY 1974). Selbst die gleiche methodische Herangehensweise führt nicht zwangsläufig zu den selben Ergebnissen. Bei Untersuchungen zu Erosionserscheinungen im Mittelmeerraum (HILL 1996) konnte ein operationalisiertes Ablaufschema für die Auswertung von multispektralen Fernerkundungsaufzeichnungen entwickelt werden, das für identische

oder annähernd gleiche naturräumliche Gegebenheiten anwendbar ist und akzeptable Ergebnisse liefert.

In letzter Zeit hat es viele Untersuchungen zur Anwendbarkeit optischer Fernerkundungssatelliten zur Differenzierung von Böden und deren Eigenschaften gegeben. In mehreren Arbeiten wurde versucht, verschiedene Bodeneinhaltsstoffe über die Nachstellung der Landsat-TM Aufnahmekanäle im Labor zu ermitteln. COLEMAN und MONTGOMERY (1987), COLEMAN (1991), BEN-DOR und BANIN (1995) sowie JAQUEMOND ET AL (1992) lieferten den Nachweis, daß die Landsat-TM Kanäle aufgrund ihrer spektralen Lage und ihrer Bandbreite durchaus die Möglichkeit bieten, Böden aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Oberbodeneigenschaften zu klassifizieren. Insbesondere der Eisenoxid- und der Humusgehalt stellten sich als eindeutig quantifizierbar heraus. COLEMAN und MONTGOMERY (1987) finden insbesondere den Kanal TM-3 für die Lokalisierung von Unterschieden im Eisengehalt und TM-4 für die Unterschiede im Humusgehalt für geeignet. AGBU ET AL. (1992) sehen in den multispektralen Scanneraufzeichnungen auch ein Informationspotential für das überdeckte geologische Ausgangsgestein. Da das Ausgangsgestein die Bodeneigenschaften zu einem Großteil prägt, können die Aufzeichnungen dahingehend interpretiert werden.

Andere Studien die sich mit Landsat-TM Aufnahmen auseinandersetzten, führten auch zu akzeptablen Ergebnissen. HENDERSON ET AL. (1989) zeigten, daß eine grobe Klassifikation der Bodenoberflächen möglich ist, deren Detaillierungsgrad jedoch nicht dem der konventionellen Bodendatenerhebung entsprach. COLEMAN (1993) ist der Meinung, daß die spektralen Daten des Landsat-TM um so effektiver genutzt werden können, je deutlicher sich die heterogenen Teilflächen in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Ihm gelang es ebenfalls, Bodenoberflächen anhand ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften mit akzeptabler Genauigkeit zu klassifizieren, wobei die dargestellte Variabilität auch relativ gering war.

Auch wenn der Landsat-TM aufgrund seiner Aufnahmebereiche verschiedene Bodenparameter lokalisieren und in einer akzeptablen Genauigkeit differenzieren bzw. klassifizieren kann, sehen COLEMAN (1993) und BRIXY (1997) Einschränkungen durch die räumliche und spektrale Auflösung des Sensors gegeben. LEE (1988), SU (1989) und KOROLYUK (1994) zeigten, daß mit der Verwendung zusätzlicher digitaler, topografischer

Informationen die Klassifizierungen der multispektralen Satellitendaten zu besseren Resultaten führen können. Die erreichte Klassifizierungsgenauigkeit lag bei 72 % (LEE 1988).

Die erreichten Klassifizierungen beruhen überwiegend auf den spektralen Eigenschaften des Humus-, des Eisen- und des Carbonatgehalts im Oberboden der betrachteten Flächen. Da Variationen in den Gehalten der jeweiligen Bodenparameter durch Erosionsschäden verursacht werden können, stellt die Fernerkundung eine potentiell geeignete Methode dar, Erosionserscheinungen auf landwirtschaftlichen Standorten zu lokalisieren und deren Fortschreitungsprozeß zu überwachen (DWIVEDI ET AL 1997). LEONE (1995) erreichte anhand von Landsat-TM Aufnahmen von Süditalien akzeptable Ergebnisse in der Lokalisierung erodierter Flächen, wobei der TM-Kanal 3 die größte positive Korrelation mit dem CaCO_3 des Ausgangsgesteins und die größte negative Korrelation mit dem Humusgehalt aufwies. BRIXY (1997) nennt dagegen für gleiche Untersuchungen im mitteldeutschen Schwarzerdegebiet den NIR-Bereich (TM-4) als den aussagekräftigsten Aufnahmebereich. Eine negative Korrelation des steigenden Humusgehalts mit den Kanälen TM-3 und TM-4 konnten auch FRAZIER ET AL. (1989) in ihren Untersuchungen zeigen, die eine Differenzierung verschiedener Areale unterschiedlicher Humusgehalte ermöglichten.

Anderen Forschungen, die sich der Lokalisierung erodierter Flächen widmeten, diente der Eisenoxidgehalt des Oberbodens als Indikator für vorhandene Erosionsprobleme (u. a. COLEMAN ET AL. 1987). Im allgemeinen werden die Kanäle TM 3,4,5 und 7 für die potentiell informativsten Aufnahmebereiche von Bodenparametern angesehen (SU 1989, THOMPSON ET AL. 1984 und FRAZIER ET AL. 1989).

Ob mit Verwendung der Fernerkundungstechnik neue, weitreichendere Informationen über den Boden bereitgestellt werden können, bleibt zumindest für die Regionen der Erde fraglich, die gut zugänglich sind und für die bereits eine Vielfalt an konventionell erhobenen Datengrundlagen, z. B. Kartenmaterial, vorliegt. Ein Vorteil könnte hier in der schnellen, kostengünstigeren Beschaffung aktueller Information liegen. In Gebieten, die wenig erforscht und dokumentiert sind und in denen, aufgrund ihrer Größe, eine herkömmliche Erhebung der Bodendaten nicht realisierbar ist, liegen die Anwendungspotentiale der satellitengestützten Differenzierung unterschiedlicher Bodeneigenschaften. Dies trifft insbesondere für Länder der sogenannten „Dritten Welt“ zu.

6.6 Lokalisierung von Feldheterogenitäten

Eine wissenschaftliche Disziplin, die sich u. a. mit der Lokalisierung von Bodenheterogenitäten befaßt, ist die Luftbildarchäologie. Ihr dienen Boden-, Schnee- und Bewuchsmerkmale zur Erkennung von historischen Strukturen im Boden (FRÖHLICH 1997). Die Lokalisierung von Feldheterogenitäten mittels digitaler Fernerkundungsdaten kann über verschiedene Herangehensweisen, die sich in dem betrachteten Parameter unterscheiden, erfolgen:

- Vegetationslose Bodenoberflächen
- Bodenwasserhaushalt
- Vegetationsbestand

Die direkte Ermittlung von Teilflächen unterschiedlicher Eigenschaften kann durch die Betrachtung vegetationsloser Standorte zu guten Ergebnissen führen. Bei trockenen Gegebenheiten erscheint es möglich, Flächen verschiedener Bodeneinhaltsstoffkombinationen über ihr spektrales Verhalten voneinander abzugrenzen. Es ist dagegen nicht möglich, genetisch stark unterschiedliche Böden zu unterscheiden, wenn diese ein gleiches oder sehr ähnliches spektrales Verhalten aufweisen (KOROLYUK 1994). Mit der Zuhilfenahme von topografischer Information kann die genetische Differenzierung verbessert werden (KOROLYUK 1994, LEE 1988 und SU 1989). Diese Herangehensweise ist besonders in ariden Gebieten sehr erfolgversprechend, da hier die erforderlichen, äußeren Gegebenheiten vorliegen. Auch in mitteleuropäischen Breiten ist die Lokalisierung von Feldheterogenitäten auf vegetationslosen Agrarstandorten erfolgreich nachgewiesen worden. In den Arbeiten von WARTENBERG (1995), AMON (1994) und SU (1988) wurde gezeigt, daß die Lokalisierung zu vegetationslosen Zeitpunkten die besten Ergebnisse liefert.

Eine andere Möglichkeit, Feldheterogenitäten oder Bodenfruchtbarkeitsunterschiede zu lokalisieren, ist die Abgrenzung über einen unterschiedlichen Bodenwasserhaushalt (nutzbare Feldkapazität) der verschiedenen Teilgebiete. Die Fähigkeit des Bodens, Wasser speichern zu können, dient als Maß für seine Fruchtbarkeit. Ein unterschiedlicher Wasserhaushalt der Standorte zeigt sich besonders in einem zeitlich verschobenen Abtroknungsverhalten nach einem Regenereignis oder in der unterschiedlichen Frühjahrsabtroknung. Die Teilschlaginformation durch Kontrastunterschiede ist dabei auf feuchten Oberflächen

maximal (AMON 1994b). Die Wahl des Aufnahmezeitpunktes ist von großer Bedeutung, wenn eine Differenzierung über den Wasserhaushalt erfolgen soll. Kurz nach einem Niederschlagsereignis sind Teilschläge nicht voneinander zu unterscheiden, weil der Boden zu diesem Zeitpunkt übersättigt ist. Unterschiede in der nutzbaren Feldkapazität (nF_k) sind erst nach dem Abfließen des Sickerwassers erkennbar (AMON 1994). Ein trockener Boden reflektiert immer stärker als ein feuchter Boden und erscheint daher in einer optischen Aufnahme heller. Feuchte Oberflächen zeichnen sich insbesondere durch die Reduzierung der Reflexionswerte im Bereich der Wasserabsorptionsbanden bei $1.4\ \mu\text{m}$ und $1.9\ \mu\text{m}$ aus (Kap.: 6.1.2.1). Der unterschiedliche Bodenwasserhaushalt hat auch Auswirkungen auf das Abtauen einer Schneedecke. Diese Auswirkungen zeigen sich zum einen bei einsetzendem Frost und erstem Schneefall im Herbst, wo die Feuchtigkeit im Boden die Wärme länger bindet und der Schnee nicht liegen bleibt. Zum anderen bleiben die feuchten, gefrorenen Flächen im Frühjahr länger mit Schnee bedeckt, da sie sich aufgrund der höheren Wärmekapazität des Wassers später erwärmen als trockener Boden (FRÖHLICH 1997).

Des Weiteren lassen sich Feldheterogenitäten indirekt über den Zustand der Vegetation auf verschiedenen Teilflächen erkennen, wobei ein und dieselbe Pflanzenart vorausgesetzt ist. Diese Lokalisierungsmethode ist besonders für Kulturlandschaften der semi-humiden und humiden Regionen geeignet, in denen die Bodenoberfläche die meiste Zeit des Jahres mit Vegetation bedeckt ist. Nach WEVER (1989) sind die Möglichkeiten dieser Methode jedoch sehr begrenzt. Er fand bei seinen Untersuchungen in der mitteleuropäischen Kulturlandschaft heraus, daß sich die Böden nur über die unterschiedliche Wasserversorgung der Pflanzen unterscheiden lassen. In Waldgebieten waren keine Differenzierungen unterschiedlicher Bodenverhältnisse möglich. Die spektralen Unterschiede beruhten primär auf Variationen der Baumarten, des Alters und der Bestandsdichte. Nach KENNEWEG (1999, mündlich) können extreme Dürreereignisse standortkorrelierte Waldschäden hervorrufen, die mit Fernerkundungsmethoden als Bodenunterschiede kartierbar sind: 1976 traten im südlichen Vogelsberg gravierende Dürreschäden an Buchen überall dort auf, wo die Lößauflage eine Mächtigkeit von 60 cm unterschritt. Es gibt weitere, indirekte Beispiele, die meist auf Extremstandorten oder nach Extremereignissen erkennbar sind.

Als Grund für die schlechte Differenzierung der Bodenverhältnisse über den Pflanzenbestand sieht WEVER (1989) die Tatsache, daß die Vegetation am Ende der Kausalkette

Ausgangsgestein - Boden - Vegetation steht und die vorherrschenden Unterschiede der Bodeneigenschaften dadurch nur abgeschwächt weitergibt. Das Reflexionssignal des Bodens ist in der Regel kontrastreicher, als das der auf ihm wachsenden Vegetation. Die Pflanzen haben aufgrund ihrer ökologischen Valenz die Fähigkeit sich an unterschiedliche Standortverhältnisse anzupassen, ohne daß sie mit unterschiedlichem Wachstum reagieren (AMON 1994). In der anthropogenen Kulturlandschaft kann die Vegetation nicht als natürlicher Bodenanzeiger dienen. In unberührten Regionen der Erde kann dieses aber der Fall sein und eine Differenzierung über Fernerkundungsdaten erfolgreich sein.

7 Digitale Bildverarbeitung

Die für die Geofernerkundung wichtigen interpretationsrelevanten Bildmerkmale sind Grauton, Textur und Muster. Sie können entweder visuell oder digital interpretiert werden. Nach bisherigen Erkenntnissen lassen sich die Textur und das Muster besser visuell interpretieren, als es auf digitale Weise möglich ist (SCHRÖDER 1986). Für die Interpretation des Grauwertes hat sich die Multispektralanalyse als effektivere Interpretationsmethode erwiesen.

Es erweist sich als sinnvoll, die verwendeten Daten vor der digitalen Auswertung auf die eine oder andere Weise, mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung zu manipulieren, um am Ende bessere Ergebnisse zu erzielen.

Für die digitale Bildverarbeitung wurde die benötigte Technik und Software von der Jenaoptronik GmbH zur Verfügung gestellt. Die Bearbeitung erfolgte teilweise auf einer Unix-Workstation und auf einem Personal Computer (PC). Als Software wurde das GIS-Programm JENATOP, welches von der Jenaoptronik GmbH selber programmiert wurde, und zusätzlich noch die Fernerkundungssoftware von EASI/PACE 6.2 (PCI) eingesetzt. Die vorverarbeitenden Arbeitsschritte wurden sämtlich mit JENATOP ausgeführt und die Ergebnisse mit PCI klassifiziert.

Die Zielsetzungen der digitalen Bildverarbeitung sind die Bildverbesserung und die Extraktion von Information. Die Bildverarbeitungstechniken werden immer dann herangezogen, wenn sie die Informationsextraktion erleichtern oder überhaupt erst ermöglichen (HABERÄCKER 1995). Die Bildverarbeitung dient der Manipulation und objektspezifischen oder zielorientierten Bildverbesserung (HILDERBRANDT 1996). Das Bildmaterial wird dabei mit Blick auf den bestimmten Auswertungszweck optimiert, um dem menschlichen Beobachter eine verbesserte Interpretationsmöglichkeit zu bieten. Sie ist deshalb auf das Erkennen, Abgrenzen, Identifizieren und Klassifizieren von Oberflächenphänomenen ausgerichtet (WEVER 1989). Des weiteren dient ein Arbeitsschritt der Bildverarbeitung der Vergleichbarkeit der digitalen Daten mit den bereits existierenden analogen Kartenwerken (*Kap.: 7.2*).

Alle im folgenden Kapitel aufgeführten Statistiken und Bearbeitungsmethoden beziehen sich auf das von mir erstellte Subimage des Untersuchungsraums und nicht auf die gesamte Satellitenszene.

7.1 Statistische Datenaufbereitung

Für eine optimale Auswertung der verwendeten Satellitendaten des Landsat-TM ist eine statistische Auswertung und eine entsprechende Aufbereitung der Daten notwendig. Statistische Verfahren zur Beurteilung des Informationsgehaltes von Landsat-TM Spektralbereichen sind z. B. die Grauwertverteilung (Histogrammerstellung) und die Korrelationsanalyse. Beide Verfahren werden in den folgenden Punkten erläutert und für die verwendete Aufnahme dargestellt.

7.1.1 Grauwertverteilung

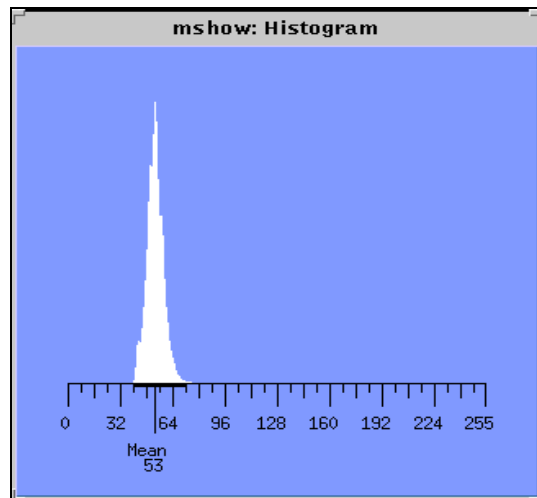
Die Darstellung der Grauwertverteilung einer Satellitenszene ist ein gut geeignetes Hilfsmittel für die digitale Bildverarbeitung, um sich einen Eindruck über den Kontrast der vorliegenden Daten zu machen. Die Form des Histogramms läßt Aussagen über die statistische Beschaffenheit der Aufnahme zu. Liegt ein Histogramm mit einem scharfen Maximum vor, so ist die Oberfläche der Szene relativ homogen. Auf einen etwas größeren Kontrastumfang deutet ein einfaches, breiter gestrecktes Maximum hin. Das Vorkommen mehrerer Maxima weist dagegen auf eine größere Heterogenität der Oberflächenbeschaffenheit hin. Es ist dabei darauf hinzuweisen, daß aus einem Histogramm nicht auf die örtliche Anordnung der Grauwerte in der Bildmatrix geschlossen werden kann. Der Grad der Asymetrie des Maximums gibt Hinweise auf die Wahl der optimalen Grauwerttransformation.

In den folgenden Abbildungen (*Abb.: 10*) sind die Grauwertverteilungskurven der zur Verwendung gelangten sechs Kanäle der Landsat-TM Daten des Untersuchungsgebietsausschnittes dargestellt. Auf die Darstellung des thermischen Kanals wurde verzichtet, da er, aus schon genannten Gründen, für die weitere Bildverarbeitung nicht herangezogen wurde (vgl. *Kap.: 3.1*). Aus den Histogrammen der Rohdaten (*Abb.: 10*) und den Maxima- und Minimawerten der Grauwertverteilung in der Tabelle 6 ist deutlich zu erkennen, daß nicht der gesamte Dynamikbereich der Grauwertverteilung von 0-255 ausgenutzt wird (vgl. *Kap.: 5.3.1.3*).

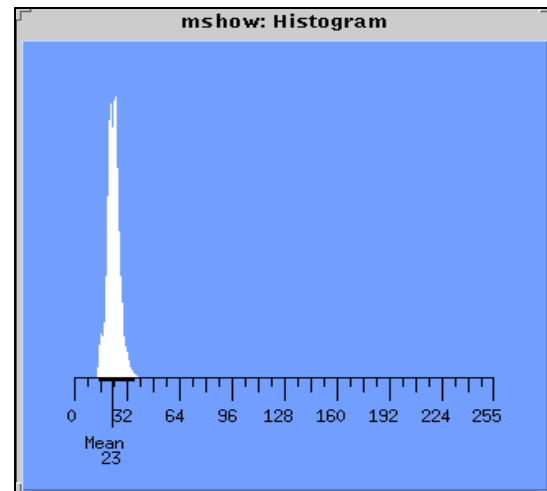
Tab. 6: Grauwertverteilung der verwendeten Kanäle des Landsat-TM Subimage.

Kanal	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Minimum	37	5	3	6	2	1
Maximum	173	115	143	175	204	205
Mittelwert	53	23	27	48	66	32
Sigma	5	3	3	15	15	11

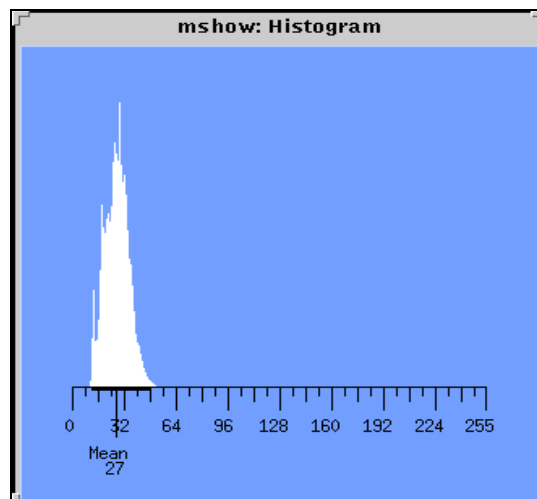
Auf der Abszisse der Histogramme sind die Grauwerte im Dynamikbereich der radiometrischen Auflösung des Landsat-TM Scanners abgetragen. Die Ordinate zeigt die Anzahl der Bildpunkte pro Grauwert, die in der Szene enthalten sind.



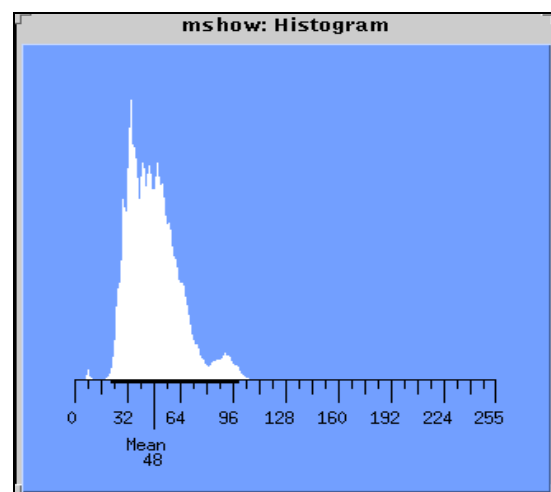
TM 1



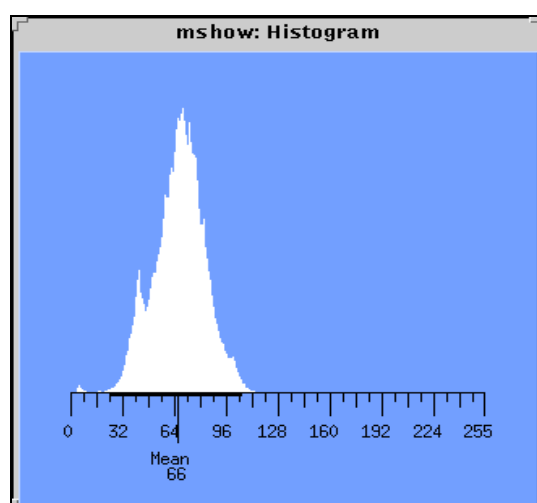
TM 2



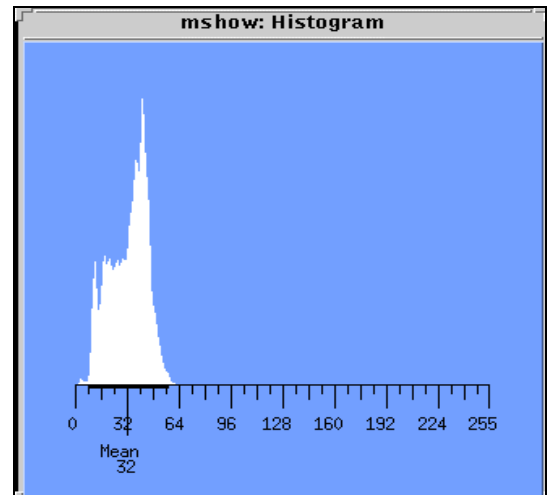
TM 3



TM 4



TM 5



TM 7

Abb. 10: Grauwerthistogramme der Landsat TM Daten in unlinearisierter Form.

7.1.2 Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse ist ein weiteres statistisches Verfahren, um den Informationsgehalt der verschiedenen TM-Spektralkanäle beurteilen zu können. Sie basiert auf dem Sachverhalt, daß ein spektraler Kanal mehr oder weniger Information eines anderen Kanals beinhaltet. Dies ist zurückzuführen auf die Überlappung der spektralen Empfindlichkeit, aber auch auf die Gestalt der Oberfläche des aufgenommenen Gebietes. SCHOWENGERDT (1983) weist darauf hin, daß häufig die benachbarten Kanäle eines multispektralen Bildes besonders hoch korrelieren.

Die TM-Kanäle des VIS (1,2,3) haben untereinander in der Regel eine relativ hohe Korrelation, wie auch die beiden Kanäle TM-5 und TM-7 des MIR-Bereiches (MULDERS, 1987). Ein Kanal hat einen hohen Korrelationskoeffizienten gegenüber den anderen Kanälen, wenn sein Informationsgehalt größtenteils durch die anderen Kanäle repräsentiert wird (SCHRÖDER 1984). Sein Eigeninformationsanteil ist in diesem Fall gering.

Der Wertebereich des Korrelationskoeffizienten r liegt zwischen $+1$ und -1 , wobei ein Wert von $+1$ einer vollständigen Korrelation entspricht. Bei dem Wert von -1 besteht ebenfalls eine starke Abhängigkeit, doch verhalten sich die Bilder wie Positiv und Negativ. Je kleiner der Betrag von r also ist, desto geringer ist die gegenseitige Abhängigkeit der Daten. Bei einem Wert von $r = 0$ besteht überhaupt keine Korrelation der Informationsgehalte mehr.

Die aus der Korrelationsanalyse gewonnenen Informationen können die richtige, optimierte Wahl der Kanalkombinationen für eine informative Farbkomposite erleichtern. CHAVEZ, BERLIN und SOWERS (1982) haben einen statistischen Wert publiziert, der als *Optimum-index-factor* (OIF) bezeichnet wird. Er berechnet mit Hilfe der Standardabweichung und des Korrelationskoeffizienten die informativste Kanalkombination des spektralen Datensatzes. In Kapitel 7.4.2 wird auf die Anwendung des OIF-Wertes bei den in dieser Arbeit verwendeten Daten eingegangen und an einem Rechenbeispiel demonstriert.

Tab. 7: Korrelationskoeffizienten der betrachteten 6 Landsat-TM Kanäle.

Kanal	1	2	3	4	5	7
1	1	0,92	0,91	-0,18	0,73	0,73
2		1	0,92	-0,20	0,74	0,68
3			1	-0,31	0,82	0,85
4				1	-0,15	-0,51
5					1	0,86
7						1

7.2 Geometrische Verbesserungen

Eine Zielsetzung der Arbeit ist es, den Informationsgehalt der Landsat-TM und IRS-1C Datensätze mit den vorhandenen Kartenwerken zu vergleichen. Es ist daher notwendig, ein einheitliches Referenzsystem zu schaffen, für welches sich das dem Kartenmaterial zugrundeliegende Gauß-Krüger-Koordinatensystem anbietet und gewählt wurde. Aufgrund der Inklination der Satelliten in der Erdumlaufbahn führt die Aufnahme der Erdoberfläche zu einer verzerrten Abbildung und macht eine Bilddrehung auf der Basis eines geodätischen Koordinatensystems erforderlich (HILDEBRANDT 1996).

Die angewendete geometrische Entzerrung basiert auf der Annahme einer bestehenden funktionalen Lagebeziehung zwischen der geometrisch verzerrten Szene und dem Referenzsystem. Für eine korrekte Entzerrung der Aufnahmen ist für jeden einzelnen Bildpunkt die Höheninformation notwendig (vgl. *Kap.: 5.3.1*). Die dritte Dimension einer zweidimensionalen Aufnahme läßt sich nur mit einer Stereoaufnahme erstellen, und diese Möglichkeit von einer Satellitenplattform bietet zur Zeit nur das SPOT-Aufnahmesystem. Für die geometrische Entzerrung der in der Arbeit verwendeten Aufnahmen des Landsat-TM und des IRS-1C ist ein digitales Geländemodell unerlässlich (BÄHR 1985). Die geometrische Korrektur des digitalen Datensatzes wird mit der Paßpunktmethod durchgeföhrt. In der Karte und der Satellitenszene werden die Koordinaten von einander entsprechenden Paßpunkten ermittelt und in eine Transformationsfunktion, die in dem Programm JENATOP enthalten ist, eingegeben. Hierfür sind mindestens drei Paßpunkte erforderlich. Die weitere Bearbeitung der Daten erfolgt in der vom Programm berechneten und ausgegebenen, georeferenzierten Form.

7.3 Radiometrische Verbesserungen

Es gibt radiometrische Korrekturen, die wegen technischer Mängel oder Defekten des Sensor- und Datenübertragungssystems notwendig sind und in der Regel von der Vertreiberfirma vor dem Verkauf vorgenommen werden. Diese Art der radiometrischen Manipulation wird im allgemeinen als *Systemkorrektur* bezeichnet.

Die radiometrische Manipulation bereits systemkorrigierter Daten dient vor allem der Verbesserung und Optimierung der Erkennbarkeit und Interpretation des vorhandenen Datenmaterials. Die Art der Manipulation richtet sich nach der jeweiligen Aufgabenstellung (HILDEBRANDT 1996) und wird *image enhancement* oder *Bildverbesserung* genannt. Das optimierte Bild kann sowohl für eine nachfolgende visuelle, als auch für eine digitale Auswertung (z. B. automatische Klassifizierung) verwendet werden.

Da die vorliegenden Datensätze bereits radiometrisch systemkorrigiert waren, wird im Folgenden nur auf die bildverbessernde, radiometrische Manipulation der Daten eingegangen. Die verschiedenen entwickelten Methoden lassen sich in drei Bereiche der bildpunktbezogenen Grauwertmanipulation einordnen, die in den folgenden Punkten behandelt werden:

- Kontrastverstärkung oder -dämpfung
- Verminderung des Atmosphäreneinflusses
- Verminderung des Reliefeinflusses

Für nähere Informationen zu den Systemkorrekturen wird an dieser Stelle auf die Fachliteratur der Fernerkundung von z. B. HILDEBRANDT (1996) und für die mathematischen Hintergründe auf HABERÄCKER (1995) verwiesen.

7.3.1 Grauwertmanipulation

Die multispektralen Scanner sind in der Regel so ausgelegt, daß sie die von den Geländeobjekten reflektierte Strahlungsenergie in einem weiten Dynamikbereich aufnehmen können, der bei dem Landsat-TM 256 Grauwertstufen entspricht (8-bit Aufzeichnung). Die Grauwertverbesserung basiert auf dem Umstand, daß dieser weite Bereich in den seltensten

Fällen ausgenutzt wird, da sich das spektrale Verhalten der natürlichen Objekte nicht so extrem darstellt (vgl. *Kap.: 5.3.1.3*).

Ein geringer Grauwertdynamikbereich führt zu Kontrastarmut in der Abbildung und erschwert die visuelle Interpretation der in den Daten enthaltenen Information. Die Grauwertmanipulation der Originaldaten ist ein häufig angewandtes Verfahren in der digitalen Bildverbesserung, um eine Kontrastverstärkung zu erzielen. Durch sie können bestimmte Grauwertintervalle hervorgehoben oder unterdrückt und besonders interessierende Grauwertbereiche in einem höheren Differenzierungsgrad dargestellt werden. Auch die Erstellung von Farbkompositen aus multispektralen Datensätzen setzt häufig eine vorherige Grauwertmanipulation voraus.

Ob eine Veränderung der Grauwerte vor einer automatischen Klassifikation durchgeführt werden sollte, ist in der Literatur strittig. Erstrecken sich die Histogramme auf einen sehr engen Dynamikbereich, so kann es sinnvoll sein, die Grauwertkontraste vorher zu verstärken (PRIETSCH 1998, mündlich).

In der Praxis gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Grauwerte der Aufnahme zu verändern. Welche Methode der Kontrastveränderung man wählt, hängt vom jeweiligen Auswertungszweck, den interessierenden Objekten sowie von deren Reflexionseigenschaften ab (HILDEBRANDT 1996). Die verschiedenen Zielstellungen der unterschiedlichen Manipulierungsmethoden sind:

- Lineare Kontraststeigerung
- Lineare Kontrastminderung
- Grauwertstreckung und -komprimierung
- Äquidensitenbildung

Die Veränderungen der Grauwertzusammensetzung ist grafisch in Abbildung 11 veranschaulicht.

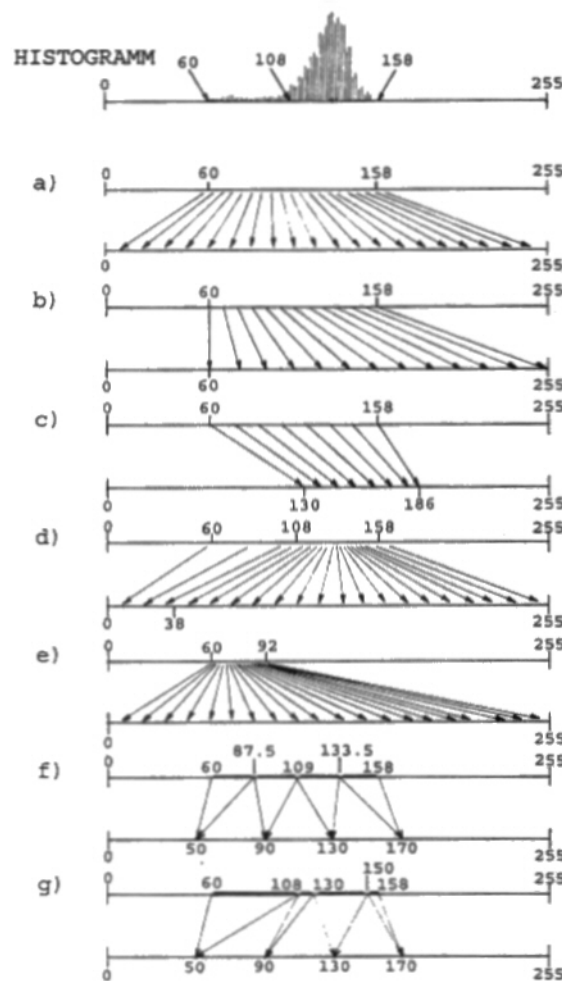


Abb. 11: Beispiel für mögliche Kontrastveränderungen (HILDEBRANDT 1996).

Die Lineare Kontraststeigerung kann über den gesamten Grauwertbereich erfolgen und zu einer gleichmäßigen Kontrastverstärkung führen, wobei helle Flächen heller und dunkle Flächen dunkler werden (Fall a). Um auch die dunklen Flächen aufzuhellen, kann auf einen Teil des Grauwertbereiches verzichtet werden (Fall b). Die lineare Kontrastminderung läßt eine Aufhellung der gesamten Abbildung zu (Fall c). Die Grauwertstreckung oder -komprimierung bezieht sich vor allem auf ein besonders interessierendes Grauwertintervall. Beide Ziele können auch gleichzeitig in einer Abbildung verfolgt werden. Ein Grauwertbereich kann gestreckt werden, um die Kontraste zu erhöhen, während ein anderer Bereich gleichzeitig gedämpft wird, um die Kontraste zu verringern (Fall d und e). Eine weitere Möglichkeit der Manipulation ist die Äquidensitenbildung, bei der mehrere Grauwertbereiche zu einem Intervall zusammengefaßt werden. Die neugebildeten Intervalle können alle den gleichen Werteumfang besitzen, aber auch unterschiedliche Größe haben. Das

Ergebnis ist ein stark kontrastierendes Bild, in dem allerdings feine Grauwertstrukturen verloren gehen. Je nach Auswertungsziel kann die eine oder andere Methode die besseren Ergebnisse liefern.

Die einfachste und in der vorliegenden Arbeit verwendete Methode der Grauwertmanipulation ist die *lineare Kontraststeigerung* (Linearisierung). Sie verstärkt die Kontraste der gesamten Szene gleichmäßig durch die Ausnutzung des gesamten verfügbaren Dynamikbereiches. In dem Softwaresystem JENATOP steht diese Rechenoperation zur Verfügung, welche die notwendigen Berechnungen auf der Grundlage der Grauwertistogramme der jeweiligen Datensätze durchführt. Ob diese Methode für die vorliegende Aufgabe die optimale Herangehensweise war, ist hinsichtlich einiger ungeklärter Fragen bei der visuellen Interpretation (*Kap.: 8.1.1*) zu hinterfragen. Möglicherweise wäre eine schlagspezifische Grauwertmanipulation sinnvoll. Der begrenzte Zeitrahmen für die Bearbeitung des Themas ließ diese Überprüfung jedoch nicht zu, so daß dieses in einer möglichen Folgearbeit untersucht werden könnte.

7.3.2 Atmosphärenkorrektur

Die Atmosphärenkorrektur soll eine deutliche Minderung der störenden Einflüsse (*Kap.: 5.4.1*) und eine Homogenisierung der Bilddaten verschiedener spektraler Kanäle, die nicht gleichmäßig stark beeinflusst werden, gewährleisten (HILDEBRANDT 1996). In der Literatur sind dazu verschiedene Korrekturverfahren genannt, die sich in ihrem Aufwand und in ihrer Genauigkeit unterscheiden. In diesem Kapitel soll nur auf ein einfaches Näherungsverfahren eingegangen werden, welches allerdings auf einer nicht ganz zutreffenden Annahme basiert. Für Informationen zu den genaueren und komplizierteren Verfahren wird auf die Literatur von z. B. HILDEBRANDT 1996, RICHTER 1992 und KAUFMANN 1990 (in ASRAR 1989), wo die verschiedenen Methoden genauer beschrieben werden, verwiesen.

Das Näherungsverfahren, das auch als *dark-object-subtraction* bezeichnet wird, geht von der Annahme aus, daß der spektrale Bereich des NIR von atmosphärischen Einflüssen nahezu verschont bleibt, was in der Realität allerdings nicht hundertprozentig zutrifft. Eine Wasserfläche hat in der Regel in dem nahen Infrarotkanal einen Grauwert von 0 oder einen ganz niedrigen Wert und stellt die dunkelste Fläche der Szene dar. In allen Kanälen des sichtbaren Spektrums, die von der Atmosphäre stärker beeinflusst werden (*Kap.: 5.4.1*), ist der

dunkelste Grauwert im Histogramm mehr oder weniger nach rechts verschoben. Diese Differenz zwischen dem dunkelsten Grauwert jedes Kanals und 0 bzw. dem niedrigsten Grauwert im NIR-Bereich wird in dem jeweiligen Kanal als Korrekturgröße von den Grauwerten aller Pixel abgezogen (HILDEBRANDT 1996). Für die Kanäle des MIR (1.55 - 2.35 μm) kann der Einfluß der Atmosphäre vernachlässigt werden (VAN DER MEER ET AL. 1995). Eine Korrektur der Daten ist in diesem Spektralbereich daher nicht notwendig.

7.3.3 Korrektur des Reliefeinflusses

In einer Satellitenaufnahme können reliefbedingte Helligkeitsunterschiede auftreten, die auf Schattenwurf und dadurch veränderter Beleuchtung beruhen. Diese Helligkeitsunterschiede führen zu verschiedenen spektralen Abbildungen ein und desselben Objektes und suggerieren dem visuellen Betrachter, aber vor allem auch dem Rechnersystem, unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften des betrachteten Objektes. Diese Störfaktoren verfälschen die Spektralsignatur und führen zu Fehlklassifikationen (HILDEBRANDT 1996).

Da man davon ausgeht, daß sich der Abschattungseffekt multiplikativ auf die Spektraldaten auswirkt, kann dieser Faktor mit Hilfe der Quotientenbildung (*Kap.: 7.4.1*) zweier Kanäle eines Datensatzes minimiert werden (HILDEBRANDT 1992). Die Reflexion eines Objektes ist in allen Kanälen unterschiedlich, je nach dem, ob es in der Sonne oder im Schatten liegt. Das Verhältnis zwischen zwei Kanälen ist aber für den schattigen und den sonnigen Bereich gleich (MULDERS 1987). Durch die Ratiobildung werden die Szenen unabhängiger von Belichtungsvariationen, weshalb sie ideal als Vorverarbeitung der Bilder vor etwaigen Analysen sind (VINCENT 1997). Nach Untersuchungen von HOLBEN und JUSTICE (1981) können topografische Effekte bis zu 83% reduziert werden. Es erscheint ebenfalls möglich, daß Feuchtigkeitseinflüsse durch diese Verknüpfung unterdrückt werden können (FRAZIER ET AL. 1989).

Eine kompliziertere Möglichkeit der Eliminierung reliefbedingter Signaturveränderungen stellt die Verwendung eines Belichtungsmodells dar, das aus einem Digitalen Geländemodell (DGM) erstellt werden kann. In das Belichtungsmodell fließen dabei die Daten der Gefällerrichtung und -neigung sowie eines gewählten Sonnenstandes (zum Zeitpunkt der Aufnahme) ein (HILDEBRANDT 1996). Die meisten Belichtungsmodelle basieren auf der Annahme einer gleichförmigen diffusen Reflexion (Lambertsche Fläche) (*Kap.: 5.2.2*). Diese

Annahme stimmt nicht ganz mit der Realität überein, doch stellt sie ein praktikables Modell für die Beleuchtungsuntersuchung dar (BAYER 1992).

Die Höhenmodelldaten können auch ohne Beleuchtungsberechnungen zu einer Verbesserung der rechnergestützten Klassifikation digitaler Bilddaten in einem stark reliefiertem Gelände beitragen. Dies geschieht über den Ausschluß des Vorkommens von Klassen bei bestimmten Expositionen, Neigungen und Höhenlagen, was über die Schwellwertmethode erreicht wird (SCHARDT 1988).

7.4 Verknüpfung verschiedener Datensätze

Die Verknüpfung der informativsten spektralen Kanäle, auf die eine oder andere Weise, ist sinnvoll, um die Datenmenge, die für eine Klassifikation verwendet wird, zu reduzieren und die verschiedenen Informationen, die in den unterschiedlichen Datensätzen enthalten, sind in einem Bildprodukt zu nutzen.

7.4.1 Ratiobildung

Eine arithmetische Verknüpfung zweier oder mehrerer Kanäle kann zu einer verbesserten Darstellung bestimmter Informationen führen. Sie kann mit einem Datensatz durchgeführt werden, aber auch mit Daten verschiedener Aufnahmezeitpunkte, z. B. für Monitoringzwecke, kann diese Verknüpfung sinnvoll sein. Von verschiedenen Autoren werden sämtliche arithmetische Operationen unter der Ratiobildung zusammengefaßt. In diesem Kapitel wird nur auf die Division zweier Kanäle eingegangen.

Ratiobilder werden erzeugt, indem die digital aufgezeichneten Reflexionsintensitäten zweier Aufnahmekanäle durcheinander dividiert werden. Dies geschieht für jedes einzelne Pixel des einen Kanals mit dem entsprechenden Pixel (gleiche x,y-Koordinaten) des anderen Kanals. Die Grauwerte des neuen Bildproduktes stellen kein Maß für die Reflexionsintensität mehr dar, sondern das Verhältnis der Helligkeit zweier Kanäle. Die Ratiobildung kann zu einer kontrastreicheren und informativeren Darstellung des Bildinhaltes, bzw. einer bestimmten, den Auswerter interessierenden, Information führen.

Die Ratiobildung stellt aus den in *Kapitel 7.3.3* genannten Gründen eine ideale Vorverarbeitung der Fernerkundungsdaten für etwaige Analysen dar. Die erstellten

Ratiobilder können in Farbkompositen weiterverarbeitet werden, oder auch als zusätzlicher Inputkanal in eine automatische, rechnergestützte Klassifikation einfließen. Die erfolgreiche Informationsgewinnung mit Hilfe der Ratiobildung hängt zu einem großen Teil von den verwendeten Kanälen ab. Die Kanäle, die zur Ratiobildung ausgesucht werden, sollten so gewählt sein, daß der eine innerhalb und der andere außerhalb der spektralen Region liegt, in der das Zielobjekt ein Minimum oder ein Maximum an Reflexionsintensität besitzt (VINCENT 1997). Die Wahl der optimalen Kanäle kann mit Hilfe der Signaturanalyse der originalen Bilddaten erfolgen.

Es ist möglich, bestimmte existierende Absorptionsbanden eines Materials zu lokalisieren, da die Reflexion zweier Wellenlängenbereiche verglichen wird. VINCENT (1997) nennt z. B. die Ratio aus dem grünen und dem roten Kanal, um Flächen unterschiedlichen Eisenoxidgehaltes zu erkennen. Hierbei wird sich der Anstieg in der Reflexion des Eisenoxids von dem grünen zu dem roten Spektralbereich zunutze gemacht. Es gibt verschiedene Versuche, bestimmte Bodeneinhaltsstoffe über eine optimale Ratiobildung darzustellen. So können Tonminerale z. B. mit das Ratio TM 5/7 (HILDEBRANDT 1992) differenziert und Flächen unterschiedlicher Humusgehalte mit verschiedenen Ratios dargestellt werden (FRAZIER ET AL. 1989, WILCOX ET AL. 1992).

Die meisten Ratios eignen sich insbesondere für die Flächenabgrenzung nach quantitativen Kriterien, um die Information für die visuelle Interpretation hervorzuheben, aber auch für eine schnelle, digitale Klassifikation, die nur auf wenige bestimmte Objektklassen ausgerichtet ist.

Neben der einfachen Quotientenbildung gibt es auch andere, kompliziertere Verfahren, in denen z. B. die Grauwerte eines Kanals durch den Durchschnittsgrauwert der anderen Bilder dividiert werden. Eine Rechenoperation, die sich als erfolgreich für die Trennung von Vegetation und Nichtvegetation erwiesen hat und in dieser Arbeit verwendet wurde, ist der NDVI (*Normalized Difference Vegetationindex*), der nach folgender Rechenvorschrift berechnet wird:

$$(NIR-ROT) / (NIR+ROT)$$

Der Vegetationsindex verwendet die Aufnahmebereiche des roten und des nahen infraroten Spektralbereichs, da in diesen Bereichen zum einen starke Absorption und zum anderen starke Reflexion der Vegetation vorliegt.

7.4.2 Farbkomposite

Der Vorteil von Farbdarstellungen liegt in der synoptischen Darstellbarkeit von verschiedenen spektralen Informationen. In der Farbenlehre gibt es verschiedene Farbdarstellungsmöglichkeiten. Die RGB-Darstellung stellt ein additives Farbmodell dar. Andere farbtheoretische Kombinationsverfahren sind das IHS oder die Munsell-Tabelle. Die IHS-Darstellung eignet sich insbesondere für die Darstellung wenig korrelierender Datensätze z. B. der Kombination von optischen mit kartografischen oder thermalen mit optischen Daten (WEVER 1989). Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf die RGB-Darstellung eingegangen. Für Informationen über die anderen Farbdarstellungsmöglichkeiten wird auf die vorhandene Fachliteratur verwiesen. Bei HABERÄCKER (1995) werden diverse unterschiedliche Farbmodelle dargestellt und ihre Zusammenhänge erläutert.

Das menschliche Auge besitzt die größte spektrale Sensibilität für die grünen Farben (*Abb.: 12*) und die geringste Sensibilität für die Farbtöne des blauen Bereichs. Aus diesem Wissen heraus ergibt sich die Forderung für die RGB-Darstellung, daß der Kanal mit der größten Grauwertvarianz der Farbe Grün und der Kanal mit der geringsten Grauwertvarianz der Farbe Blau zugeteilt werden sollte.

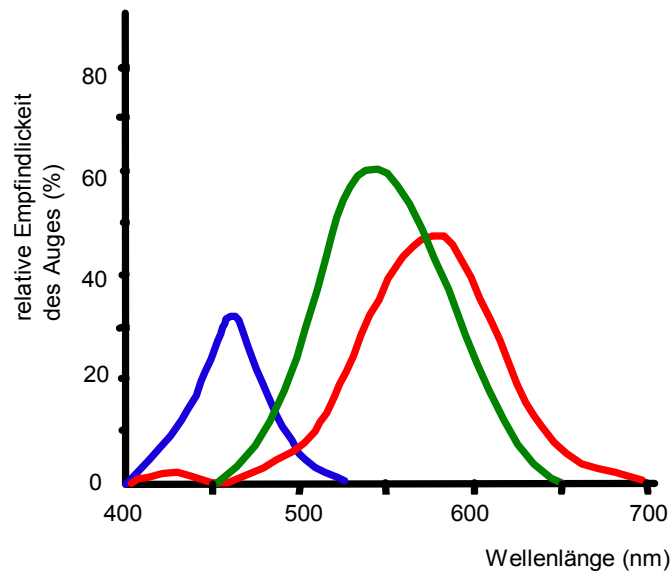


Abb. 12: Relative Reaktion der Photopigmente des menschlichen Auges (aus HILDEBRANDT 1996).

Für ein Farbkompositenbild (RGB-Darstellung) aus drei Kanälen gibt es bei sechs betrachteten Kanälen 20 verschiedene Kanalkombinationsmöglichkeiten. Aufgrund der unterschiedlich starken Korrelation der einzelnen Kanäle untereinander hat jede Kombination der Kanäle einen anderen Informationsgehalt. Der höchste Informationsgehalt wird erreicht, wenn die am geringsten korrelierten Kanäle verwendet werden. Farbkompositen aus kaum miteinander korrelierten Kanälen zeichnen sich durch einen hohen Kontrast aus.

Es ist bekannt, daß die Kanäle des sichtbaren Spektrums TM 1, TM 2 und TM 3, und die Kanäle des MIR TM-5 und TM-7 untereinander relativ stark miteinander korreliert sind (MULDERS 1987). SHEFFIELD (1985) untersuchte den Informationsgehalt verschiedener Kanalkombinationen in der RGB-Darstellung. Dabei kam er zu der Erkenntnis, daß die informativste Darstellung in der Regel einen Kanal aus dem MIR (TM-5 oder TM-7) beinhaltet. Bei den meisten TM-Datensätzen hat sich die Kanalkombination TM-1, TM-4, und TM-5 als eine der besten erwiesen.

Da die Bearbeitung aller 20 verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten den Zeitrahmen der Arbeit überschreiten würde, war es notwendig, die in Frage kommenden Kanalkombinationen nach ihrem Informationsgehalt auszuwählen. Für diesen Zweck wurden die aus der statistischen Korrelationsanalyse gewonnenen Informationen ausgenutzt (Kap.: 7.1.1 und 7.1.2). Mit Hilfe des von CHAVEZ, BERLIN und SOWERS (1982) veröffentlichten *Optimum-*

index-factor (OIF) läßt sich eine statistische Aussage über den Informationsgehalt der Kanalkombination machen (vgl. Kap.: 7.1.2). Der OIF-Wert ist die Division der Summe der Standardabweichungen durch die Summe der drei absoluten Korrelationskoeffizienten zwischen zwei der verwendeten drei Kanäle. Das Ziel dieses Faktors ist das Aufzeigen des Informationsgehaltes der verschiedenen Triplets und darauf aufbauend die Verwendung möglichst gering korrelierter Kanäle für die Farbbilderstellung. Das Ziel der Entkorrelierung entspricht dem der Hauptkomponententransformation, wobei ein Unterschied in der Interpretierbarkeit der Farbkodierung besteht. Im Gegensatz zu der Hauptkomponententransformation bleibt hierbei die farbkodierte Information anhand der chemischen und physikalischen Eigenschaften des betrachteten Objekts interpretierbar. Der OIF wurde u. a. in den Arbeiten von DWIVEDI ET AL. (1992) und HILDEBRANDT (1992) erfolgreich verwendet.

Die Berechnung des OIF-Wertes soll im Folgenden an dem Kanaltriplet TM-1, TM-4 und TM-5 erläutert werden. Für das Rechenbeispiel werden die in den Tabellen 6 und 7 aufgeführten Werte der Standardabweichungen und der Korrelationskoeffizienten herangezogen.

Rechenbeispiel:

Die Summe der Standardabweichungen ergibt sich aus der Addition der Sigmawerte aus Tabelle 6. Für die drei gewählten Kanäle ist dies $\Sigma = 35$. Die Summe der absoluten Korrelationskoeffizienten ergibt sich aus der Addition der in Tabelle 7 aufgeführten Werte: $0,18 + 0,73 + 0,15 = 1,06$. Durch die Division der beiden errechneten Summen erhält man den gerundeten OIF-Wert. $35 / 1,06 = 33,02$ (Tab.: 8). Die Berechnung für die anderen Kanalkombinationen wird analog durchgeführt.

In Tabelle 8 ist der Optimum-Index-Faktor für die verwendeten sechs Kanäle der Landsat TM-Szene und deren Kombinationen in absteigender Reihenfolge dargestellt. In dieser Darstellung wird nicht die Zuordnung der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau berücksichtigt. Auffällig ist, daß die ersten sechs Kanalkombinationen alle den Kanal 4 und einen Kanal aus dem MIR enthalten. Es ist daher davon auszugehen, daß eine Kanalkombination mit einem Kanal aus dem NIR und einem aus dem MIR am aussagekräftigsten ist.

Tab. 8: Werte des Optimum-Index-Faktors (OFI) und die Rangfolge für die TM-Kanaltriplets.

	Σ Standardab- weichungen.	Σ Korrelations- Koeffizienten	<u>Stand.abw</u> Kor.koeff.
145	35	1,06	33,02
245	33	1,09	30,28
457	41	1,52	26,97
345	33	1,28	25,78
147	31	1,42	21,83
247	29	1,39	20,86
124	23	1,30	17,69
347	29	1,67	17,37
134	23	1,40	16,43
234	21	1,43	14,69
157	31	2,32	13,36
257	29	2,28	12,72
357	29	2,53	11,46
125	23	2,39	9,62
135	23	2,46	9,35
235	21	2,48	8,47
127	19	2,33	8,15
137	19	2,49	7,63
237	17	2,45	6,94
123	11	2,75	4,00

Durch die Zuteilung der drei Grundfarben zu den Kanälen kann die Erkennbarkeit des Informationsgehaltes für das menschliche Auge beeinflusst werden. Aufgrund seiner Forschungen schlägt SHEFFIELD (1985) in diesem Fall vor, die drei Grundfarben den Kanälen nach deren Grauwertvarianz zuzuweisen und am menschlichen Sehempfinden zu orientieren, um den Informationsgehalt bestmöglich herauszuholen (*Abb.: 12*).

Farbmischbilder müssen nicht zwingendermaßen aus den Rohdaten erstellt werden. Eine Vorverarbeitung durch Ratiobildung, Hauptkomponententransformation oder Grauwertmanipulation ist sogar teilweise ratsam, um eine kontrastreiche Wiedergabe spezieller, gewollter Informationen zu erreichen und die Erkennbarkeit der Information zu verbessern. Welche Daten verwendet werden sollten, hängt jeweils von der Aufgabenstellung und dem Ziel ab und muß daher von Fall zu Fall ausprobiert und entschieden werden.

Für die in der Arbeit verwendeten Datensätze erwies sich eine vorherige Linearisierung der Grauwertverteilung als notwendig, da in der Farbdarstellung der Rohdaten kaum erkennbare

Information vorhanden war. Dies ist möglicherweise auf den relativ geringen Kontrastumfang der verwendeten Landsat-TM Daten zurückzuführen.

7.5 Digitale Auswertung

Die Multispektralklassifizierung von digitalen Multispektraldaten beruht auf dem unterschiedlichen Reflexionsverhalten natürlicher Objekte in den verschiedenen Wellenlängenspektren, das eine Erkennung dieser Objekte aufgrund ihrer Farbe zuläßt (HILDEBRANDT 1992). Sie hat das Ziel, die Bildelemente der Daten im n-dimensionalen Merkmalsraum nach spektralen Signaturen zu gruppieren (*Clusterung*). Die spektrale Mustererkennung (*spectral pattern recognition*) basiert auf den spektralen Merkmalen der einzelnen Bildelemente (Pixel), d.h. deren Zuordnung zu den jeweiligen Klassen (*Cluster*) erfolgt über die Grauwertsignatur. Die daraus resultierende Zusammenfassung bzw. Verringerung des Informationsgehalts der Daten ermöglicht es, thematische Informationen für bestimmte Anwendungen zu nutzen, oder im Rahmen eines GIS mit Zusatzinformationen zu verknüpfen. Eine Klassifizierung von Objekten kann nur erfolgreich sein, wenn sich die spektralen Signaturen ausreichend unterscheiden. Die Eignung der Multispektralanalyse zur Feststellung unterschiedlicher Bodenmerkmale wurde schon in verschiedenen Studien, u. a. von SCHRÖDER (1986, 1988, 1989), FRAZIER ET AL. (1989) und BRIXY (1997) nachgewiesen.

Die verschiedenen, entwickelten Klassifizierungsverfahren, die in den meisten Softwareprodukten enthalten sind, beziehen sich einzig und allein auf die spektrale Information, die die Datensätze enthalten. Etwaige textuelle Merkmale und logische Beziehungen zwischen den benachbarten Objekten, die dem visuellen Interpretieren hilfreich sein können, werden in ihnen nicht berücksichtigt. Die spektralen Signaturen geben lediglich eine Differenzierung in den chemischen und physikalischen Objekteigenschaften wieder. Verschiedene Autoren (u.a.. GLASER 1989) weisen im Zusammenhang mit der automatischen Klassifizierung darauf hin, daß mit der Zunahme der Zahl der vorgegebenen Klassen das Resultat der Klassifikation ungenauer wird.

Eine größere Anzahl verwendeter Kanäle liefert in der Regel mehr Information über das abgebildete Objekt, doch wird mit der Zunahme der Kanalanzahl auch die Interpretation des Datensatzes erschwert. Nach verschiedenen Untersuchungen mit Flugzeug-MSS-Daten ist die Klassifizierungswirksamkeit nicht der Anzahl der verwendeten Kanälen proportional (TAN

1988). Es ist daher sinnvoll, vor der Klassifikation zu überlegen, welche und wieviele Kanäle für die Klassifikation genutzt werden sollen. „Das fundamentale Prinzip ist, die zu identifizierenden Objektklassen mit möglichst wenigen Kanälen trennbar zu machen“ (TAN 1988). Ein anderer Vorteil von möglichst wenig verwendeten Kanälen liegt in der Verkleinerung des Datensatzes und damit einhergehend der Verringerung der benötigten Rechenzeit. Auch SCHRÖDER (1989) geht davon aus, daß der zwei bis dreidimensionale Merkmalsraum zur Objekttrennung ausreicht.

SHORT (1982) dagegen sieht für geologische Untersuchungen das Gegenteil von Vorteil, d. h. es kommt zu einer Zunahme der Genauigkeit der Klassenzuteilung mit Hinzufügen weiterer Kanäle. Auch COLEMAN ET AL. (1991) kommen zu dem Ergebnis, daß die Möglichkeit der Vorhersage von Bodeneigenschaften mittels Satellitendaten im allgemeinen durch die Hinzunahme von mehreren Kanälen ansteigt.

Die verschiedenen gängigen rechnergestützten Klassifizierungsverfahren, die heute in der Praxis für die Interpretation von digitalen Fernerkundungsdaten verwendet werden, lassen sich in überwachte (*supervised*) und unüberwachte (*unsupervised*) Klassifikationen einteilen. Beide sollen im Folgenden kurz beschrieben werden, um einen Überblick über die Möglichkeiten zu vermitteln. Weitere detaillierte Ausführungen finden sich unter anderem bei RICHARDS (1993), HILDEBRANDT (1996) LILLESAND und KIEFER (1987) und HABERÄCKER (1995). Es werden ständig neue Klassifizierungsalgorithmen entwickelt, die sich aber erst in der Praxis durchsetzen müssen. Eine Methode die in der Zukunft möglicherweise mehr Verwendung finden wird, sind die neuronalen Netze. Sie werden bei HABERÄCKER (1995) ausführlich beschrieben.

7.5.1 Unüberwachte Klassifizierung

Bei der unüberwachten Klassifikation wird von Grauwertkombinationen ausgegangen, ohne deren Zuordnung zu Musterklassen zu kennen. Der Rechner ordnet die Bildelemente in meist iterativen Prozessen, selbständig, nach ähnlichen spektralen Wertekombinationen (Merkmalsvektoren) verschiedenen, in sich möglichst homogenen, Gruppen zu. Die Zuweisung der Pixel zu einer Klasse beruht dabei auf einem vorher definierten Klassifikator, der meist ein spektrales Abstandsmaß darstellt. Auf diese Weise können auch Klassen entstehen, mit denen der Auswerter vorher nicht gerechnet hat, bzw. deren Existenz bisher

nicht bekannt war. Die Bedeutung und die thematische Aussage der erhaltenen Spektralklassen muß nachträglich ermittelt werden (LILLESAND UND KIEFER 1987), was sich bei einem ausgedehnten Gebiet als sehr schwierig und zeitaufwendig erweisen kann. Aus diesem Grund und wegen des sehr hohen Rechenaufwands dieser Klassifikationsmethode hat sich in der Praxis der Bildverarbeitung ein kombiniertes Verfahren (Hybrid-Klassifikation) herausgebildet. Für ein vorher definiertes Teilgebiet, in dem möglichst alle in dem Gesamtgebiet enthaltenen Objektklassen vertreten sind, wird eine unüberwachte Klassifikation durchgeführt, und die erhaltenen Spektralklassen fließen als Trainingsgebiete in die überwachte Klassifikation (Kap.: 7.5.2) ein.

Für die unüberwachte Clusteranalyse wurde in dieser Arbeit das Softwarepaket EASI/PACE 6.2 (PCI) verwendet. In diesem Programm standen drei verschiedene unüberwachte Klassifizierungsalgorithmen zur Verfügung. Dies waren *K-means*, *Fuzzy K-means* und *Isodata*. In den folgenden Abschnitten werden deren zugrundeliegenden theoretischen Ansätze in Kürze beschrieben.

7.5.1.1 K-Means-Klassifikator

Der K-Means Algorithmus ist einer der einfachsten Clusteralgorithmen, die in der Praxis verwendet werden. Der Benutzer hat die Möglichkeit, eine gewollte Anzahl von Klassen vorzugeben und kann auch die anfänglichen Mittelvektoren bestimmen. Werden keine Mittelvektoren bestimmt, so sucht sich das Programm eigenständig Mittelvektoren für die zu bestimmenden Klassen aus. In diesem iterativ ablaufenden Verfahren werden alle Pixel des Bildes dem Cluster zugeordnet, dem sein Mittelvektor am nächsten kommt. Aus diesen entstandenen Klassen werden neue Mittelvektoren kalkuliert, denen dann wiederum alle Pixel neu zugeordnet werden. Dieser Vorgang läuft solange ab, bis keine signifikanten Veränderungen in der Pixelzuteilung zu den Klassen von einer Iteration zu der darauffolgenden bestehen, oder bis die vorher angegebene Höchstzahl an Durchläufen erreicht ist (PCI 1996).

7.5.1.2 Isodata-Klassifikator

Der Isodata-Algorithmus ist eine Weiterentwicklung des K-means-Klassifikators und diesem sehr ähnlich. Auch hier können die Anzahl der Klassen und die anfänglichen Mittelvektoren

vorgegeben werden. Nach einer durchlaufenen Iteration werden hierbei die entstandenen Cluster statistisch untersucht und alle, die den folgenden Punkten nicht entsprechen werden aufgelöst:

- ist die Standardabweichung innerhalb eines Clusters zu groß, so werden zwei neue Klassen gebildet
- liegen zwei Cluster statistisch in dem multidimensionalen Raum zu nah beieinander, so werden sie zu einem Cluster zusammengefaßt
- Cluster mit einer zu geringen Anzahl von Pixeln werden aufgelöst

Da es wahrscheinlich ist, daß die statistischen Gegebenheiten der Daten nicht immer genau eine Anzahl von Klassen zuläßt, kann die Anzahl der zu erstellenden Klassen, von dem Bearbeiter mit einem Maximum- und einem Minimumwert eingegrenzt werden (PCI 1996).

7.5.1.3 Fuzzy K-Means-Klassifikator

Der Fuzzy-Logic-Klassifikator wird im deutschen Sprachgebrauch auch mit der Terminologie des unscharfen Klassifikators belegt. Dies ist auf den theoretischen Ansatz (ZADEH 1965) dieser Klassifikationsmethode zurückzuführen, der versucht, die Unsicherheit von bestimmten Aussagen mit zu berücksichtigen (PCI 1996). Die Fuzzy-Logic wird der teilweise unvollständigen Kenntnis komplexer Zusammenhänge gerecht, die eine eindeutige Zugehörigkeitsaussage zu einer Menge unmöglich macht.

Als Ergebnis der Fuzzy-Logic wird nicht, wie von den herkömmlichen „scharfen“ Klassifikatoren bekannt, jeder Merkmalsvektor genau einer Klasse zugeordnet, sondern jeder Merkmalsvektor wird allen Cluster-Zentren zugeteilt. Ein Merkmalsvektor hat jedoch für jede Klasse einen unterschiedlichen Mitgliedsgradwert, der definiert, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, daß er zu der jeweiligen Klasse zugehörig ist. Die Segmentierung nach der Fuzzy Logic ordnet eine Menge von Merkmalsvektoren einer vordefinierten Anzahl von Klassen zu, wobei von einer willkürlichen, anfänglichen Verteilung der Cluster-Zentren ausgegangen wird, deren Lage in mehreren Iterationsschritten verändert wird (HABERÄCKER 1995). Findet keine signifikante Veränderung der Zuordnungen von der einen Iteration zu der nächsten statt, so ist die Klassifikation beendet. Die mathematischen Hintergründe dieses Klassifikators sind u. a. bei HABERÄCKER (1995) dargelegt.

7.5.2 Überwachte Klassifikation

Für eine überwachte Klassifikation ist es notwendig, dem Klassifizierungsprogramm Informationen über die spektralen Eigenschaften der gewünschten Klassen zu geben. Dazu werden im voraus repräsentative Musterklassen bzw. Trainingsgebiete der zu differenzierenden Klassen festgelegt, von denen bekannt ist, zu welcher Klasse sie gehören. Eine Musterklasse kann aus mehreren Trainingsgebieten bestehen. Dies ist teilweise sinnvoll, damit ein größtmöglicher Dynamikbereich an Grauwertkombinationen, die diese eine Objektklasse repräsentieren, enthalten ist und das Klassifikationsergebnis verbessert wird. Jedes Pixel wird während der Klassifikation mit den statistischen Merkmalen der Musterklassen verglichen und mit Hilfe einer klassifikatorspezifischen Entscheidungsfunktion der Klasse zugeordnet, die eine gleiche oder ähnliche Grauwertkombination aufweist.

In dem Softwareprogramm PCI stehen drei verschiedene Klassifikatoren für eine überwachte Klassifikation bereit. Dies sind die Minimum-Distance, Parallelepiped und Maximum-Likelihood Verfahren, die alle auf unterschiedlichen Entscheidungsfunktionen beruhen.

7.5.2.1 Das Minimum-Distance-Verfahren

Für jede Musterklasse wird ein Mittelwert im n-dimensionalen Merkmalsraum berechnet, der auch als Mittelvektor bezeichnet wird. Für jedes Pixel wird der Abstand zu den Mittelwerten aller Musterklassen berechnet. Der Minimum-Distance-Klassifikator ordnet einen unbekannten n-dimensionalen Merkmalsvektor immer derjenigen Klasse zu, zu der er den kürzesten Abstand im Merkmalsraum hat. Dabei wird der Abstand des zu klassifizierenden Pixels zu den Mittelpunkten der unterschiedlichen Musterklassen, die durch die Trainingsgebiete definiert sind, im spektralen Merkmalsraum berechnet und das Pixel der Klasse zugeordnet, zu deren Mittelpunkt der kürzeste Abstand vorliegt (RICHARDS 1993).

Dieses Verfahren zeichnet sich durch den relativ geringen Rechenaufwand aus. Das geht allerdings zu Lasten der Klassifizierungsgenauigkeit. Die Streuung innerhalb der einzelnen Klassen wird durch diesen Algorithmus nicht berücksichtigt, so daß häufig Pixel einer Klasse zugeordnet werden, der sie mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit nicht angehören. Besonders bei der Klassifizierung vegetationsbestandener Flächen kommen häufig Überschneidungen der Grauwertcluster vor, die Fehlklassifizierungen nach sich ziehen (HILDEBRANDT 1996).

Auf die mathematischen Grundlagen dieses Klassifikators wird bei HABERÄCKER (1995) eingegangen.

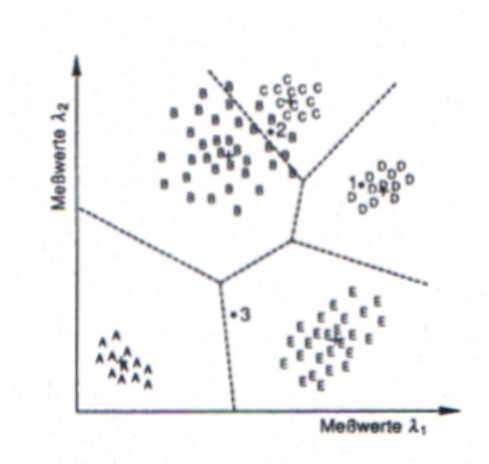


Abb. 13: Minimum-Distance-Verfahren (Abbildung aus ALBERTZ 1991).

7.5.2.2 Das Parallelepiped-Verfahren (Hyperbox)

Die grundlegende Idee dieses Verfahrens ist folgende. Für jede Klasse, die gebildet werden soll, wird für jeden in die Klassifizierung einfließenden Kanal ein Intervall aus oberer und unterer Grauwertschwelle definiert, in dem die entsprechende Komponente des zu klassifizierenden Merkmalsvektors liegen darf. In einem n-dimensionalen Raum kann die Klasse einem n-dimensionalen, achsenparallelen Quader angenähert werden (HABERÄCKER 1995). Die Zuordnung eines Bildelements zu einem der Musterklassen-Quader erfolgt durch Abfrage, welcher Quader seine Grauwertkombination enthält. Falls der Merkmalsvektor außerhalb aller Quader liegt, wird das Pixel nicht klassifiziert, oder wird der Zurückweisungsklasse zugeteilt.

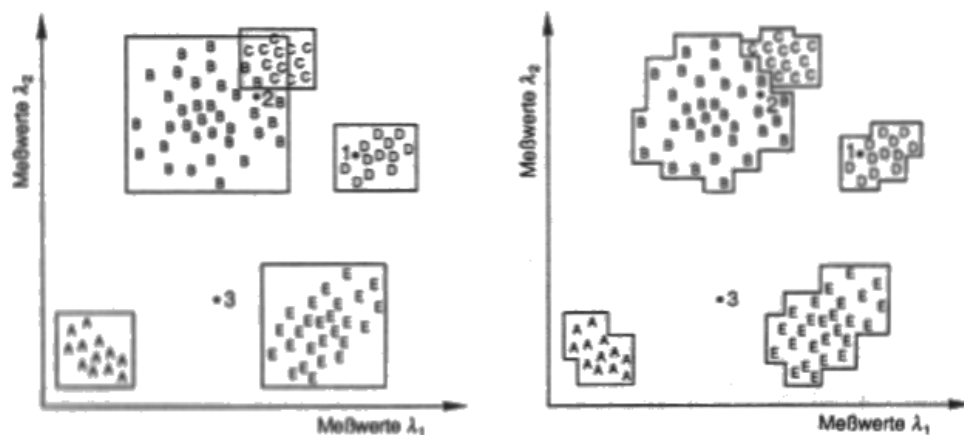


Abb. 14: Parallelepiped-Klassifikator: Durch die Festlegung unterer und oberer Grenzen werden für eine Klasse werden rechteckige Merkmalsräume definiert (nach ALBERTZ 1991).

Dieser Klassifikator zeichnet sich durch seine kurzen Rechenzeiten aus, läßt aber in der Klassifizierungsgenauigkeit häufig zu wünschen übrig. Das Problem des Parallelepiped-Klassifikators liegt in der häufigen Überschneidung der einzelnen Quader der Klassen im n -dimensionalen Merkmalsraum, die eine Zuweisung zu einer Klasse unmöglich macht. Dieses Problem nimmt mit der Zunahme der Korrelation der Grauwerte der einzelnen Kanäle zu. Liegen zu starke Korrelationen vor, so kann dem ggf. durch eine vorangestellte Hauptkomponententransformation abgeholfen werden. Bei einer anderen Lösung dieses Problems wird auf alle nicht zuzuordnenden Merkmalsvektoren ein vollständiger Minimum-Distance (Kap.: 7.5.2.1) oder Maximum-Likelihood-Klassifikator (Kap.: 7.5.2.3) angewendet. Der in PCI vorhandene Algorithmus verwendet den Maximum Likelihood Klassifikator als sogenannten „tie breaker“ (PCI 1996).

7.5.2.3 Das Maximum-Likelihood-Verfahren

Bei diesem etwas aufwendigeren Verfahren wird davon ausgegangen, daß die Grauwertverteilung einer jeden Klasse in jedem Spektralkanal näherungsweise mit einer n -dimensionalen Gauß'schen Normalverteilung beschrieben werden kann. Diese Annahme der Grauwertverteilung einer Klasse liegt zwar selten in strenger Form vor, doch zeigen die Erfahrungen, daß man von ihr als Arbeitshypothese, für genügend große Musterklassen, in der Regel ausgehen darf (HILDEBRANDT 1996).

Dieses Verfahren ist ein statistischer Ansatz, der sich auf die Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung stützt. Unter Verwendung des Mittelvektors und der Kovarianzmatrix, als Maß für die Streuung einer Klasse, kann jede Klasse im mehrdimensionalen Merkmalsraum beschrieben werden. Mit Hilfe dieser Parameter kann für jedes Bildelement bestimmter Grauwertkombination die statistische Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Musterklassenzugehörigkeit berechnet werden (LILLESAND und KIEFER 1987). Jedes Pixel wird der Klasse zugewiesen, für die sich die höchste Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit ergibt. Als Restriktion für die Zuweisung zu einer Klasse muß eine Mindestwahrscheinlichkeit überschritten werden. Diese Zurückweisungsschwelle kann von dem Anwender vorher definiert werden, oder wird von dem jeweiligen Softwareprogramm vorgegeben. Wird dieser Schwellenwert nicht erreicht, so bleibt das Pixel unklassifiziert und wird der Zurückweisungsklasse zugeordnet.

Dieses sehr rechenzeitaufwendige Verfahren hat den Vorteil, daß die Streuung innerhalb der Klassen berücksichtigt wird. Es bietet bisher die genauesten Ergebnisse der herkömmlichen Klassifizierungsmethoden. Ein Nachteil besteht darin, daß die oben erwähnte Voraussetzung der Gauß'schen Normalverteilung gegeben sein muß, damit dieses Verfahren uneingeschränkt angewendet werden kann und akzeptable Ergebnisse liefert. Für einige bestimmte Fernerkundungsdaten liegt jedoch keine Normalverteilung der Pixelgrauwerte vor. So kann man bei heterogenen Vegetationsflächen, wie z. B. den tropischen Regenwäldern, oder bei Radardaten, nicht von der geforderten Normalverteilung ausgehen (GAH 1995).

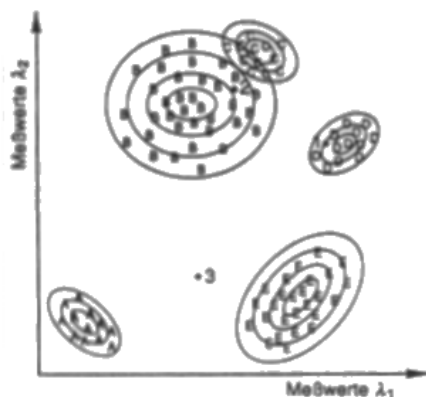


Abb.15: Maximum Likelihood Verfahren (Abbildung aus ALBERTZ 1991).

Der Maximum-Likelihood-Klassifikator liefert nicht die besten Ergebnisse, wenn eine möglichst hohe Anzahl von Inputkanälen verwendet wird. Vielmehr gibt es nur eine relativ geringe, optimale Anzahl von Inputkanälen. Dies ist auf die Korrelation der Kanäle und die damit, bezogen auf den Informationsgehalt existierenden, redundanten Daten zurückzuführen. Es ist daher sinnvoll die informativsten und unkorrelierten Kanäle vor der Klassifikation auszuwählen (PCI 1996). Auf die mathematischen Grundlagen wird im Rahmen der Arbeit nicht eingegangen, sondern auf z. B. HABERÄCKER (1995) verwiesen.

8 Visuelle und digitale Auswertung

Das folgende Kapitel über die Analyse der Satellitenbildinformation gliedert sich in zwei Hauptbereiche auf:

Im ersten Teil wird der inhaltliche Zusammenhang der digitalen, optischen Aufzeichnung mit der vorliegenden *Ground truth* Information (Kap.: 3.2) über die vorhandenen Böden im Hinblick auf die dargestellten Heterogenitäten analysiert. Der Schwerpunkt der Analyse liegt in der visuellen Interpretation der Grauwertverteilung (Kap.: 8.1.1). Zusätzlich wird eine computergestützte Klassifikation der einzelnen Testschläge durchgeführt, um eine objektive Abgrenzung heterogener Teilflächen aufgrund ihrer spektralen Merkmalsvektoren zu erhalten (Kap.: 8.1.2). Die Klassifikation des gesamten Untersuchungsraumes in Kapitel 8.1.3 dient der Analyse der Aussagefähigkeit des Klassifikationsergebnisses und der Anwendbarkeit dieser Methode bezogen auf ein großes Gebiet. Aufgrund der geringen verfügbaren *Ground truth* Information (Kap.: 3.2) über den Boden basiert die Interpretation der spektralen Heterogenitäten lediglich auf dem Informationsgehalt der verwendeten Kartenwerke.

Die Aussagen zu den reflexionswirksamen Bodenparametern, die auf den Testschlägen ihre Reflexionswirksamkeit entfalten, können sich nur auf die Parameter beschränken, die aus der RBS zu entnehmen sind. Zu den meisten potentiell reflexionswirksamen Parametern (vgl. Kap.: 6.1) fehlen jedoch in diesem Kartenwerk jegliche Informationen. Es lassen sich daher nur wenige gesicherte Aussagen zu der Beschaffenheit der Feldheterogenitäten anhand der spektralen Signaturanalyse machen. Die Richtigkeit der Interpretation müßte man zudem vor Ort in einem Feldprogramm verifizieren. Der Arbeitsaufwand und die Planung der Feldarbeit können durch die Ausweisung spektral einheitlicher Teilflächen (Stratum) erleichtert und minimiert werden (Kap.: 8.1.3). Für die nicht interpretierbaren Heterogenitäten soll es im Rahmen dieser Arbeit ausreichend sein, daß spektrale Unterschiede in der Bodenoberfläche vorliegen, die nicht aus der Karte zu entnehmen sind, und somit zusätzliche Informationen durch die fernerkundlichen Aufzeichnungen bereitgestellt werden können. In diesem Fall gilt ebenfalls, daß die notwendige Information durch ein Feldprogramm erhoben werden müßte.

Der zweite Teil der Auswertung (*Kap.: 8.2*) zielt auf die Untersuchung konkreter Korrelationen zwischen der Grauwertverteilung der Reflexion und der räumlichen Verteilungsmuster verschiedener Bodenparameter ab. Hierbei wurden die vorliegenden Bodenuntersuchungsergebnisse von Schlag 211 (*Kap.: 3.2.5*) herangezogen, da diese genaue Informationen über die räumliche Verteilung und die Gehaltsmengen der untersuchten Bodeneinhaltsstoffe liefern. Es soll die Reflexionswirksamkeit der verschiedenen Bodenparameter analysiert werden.

Die durchgeführten Untersuchungen sollen Hinweise über das Anwendungspotential optischer, multispektraler Satellitenaufnahmen für bodenkundliche Fragestellungen liefern. Von besonderem Interesse war dabei, inwiefern die Satellitenfernerkundung eine weitere Informationsebene zu den konventionell erhobenen Daten darstellt, mit der auf rationelle Art und Weise Informationen über die heterogenen Standorteigenschaften der landwirtschaftlichen Nutzfläche bereitgestellt werden können.

8.1 Informationsvergleich von Karte und Satellitenbild

Die Untersuchung über die inhaltlichen Korrelationen oder Differenzen zwischen der Satellitenaufnahme und den vorhandenen bodengeografischen Kartenwerken, sowie die inhaltliche Interpretation der Heterogenitäten, wird größtenteils anhand des digitalen Datensatzes des Landsat-TM vom 22.09.1997 durchgeführt. Die Daten des IRS-1C vom 25.09.1997 werden lediglich für vergleichende Zwecke herangezogen. Der Vergleich der beiden Sensoren soll Aufschlüsse darüber erbringen, welche spektralen Aufnahmekanäle für die Erkennung von Feldheterogenitäten im Untersuchungsgebiet das größere Informationspotential beinhalten. Dabei wurde besonders darauf eingegangen, welche Bodenparameter überhaupt in den Fernerkundungsdaten dargestellt werden und sich aufgrund ihrer spektralen Signatur differenzieren lassen. Hierbei konnte konkret nur auf die in den Bodenkarten enthaltenen Aussagen eingegangen werden, da eine weitere, genauere Datengrundlage über die Bodenparameter fehlte.

Für die visuelle Auswertung wurden die Daten vorab mit bildverbessernden Methoden aufbereitet. Die Grauwerte der geokodierten Rohdaten wurden mit dem Softwareprogramm JENATOP linearisiert (*Kap.: 7.3.1*). Für die Kanäle des sichtbaren, elektromagnetischen Spektrums wurde eine einfache Atmosphärenkorrektur durchgeführt (*Kap.: 7.3.2*). Die

Datensätze der beiden Aufnahmesysteme unterscheiden sich in ihrer spektralen (*Kap.: 5.3.2*) und geografischen Auflösung, wobei letzteres durch die Geokodierung der Daten angeglichen wurde (*Kap.: 3.1*).

8.1.1 Visuelle Auswertung der Testgebiete

Für den Vergleich der Satellitenbildinformation mit der Information der Reichsbodenschätzung wurden stichprobenartig einige Testschläge ausgewählt, auf denen zum Aufnahmezeitpunkt der Fernerkundungsdaten keine Vegetationsbedeckung (*Kap.: 4.4.2*) vorlag, und die nach Möglichkeit verschiedene heterogene Bodenareale aufweisen. Sie wurden nach einer Betrachtung der verschiedenen spektralen Aufnahmen und der Verschneidung mit den Klassengrenzen der MMK im GIS JENATOP ausgewählt. Es wurde insbesondere darauf geachtet, daß in dem Reflexionssignal der Testschläge eindeutig abgrenzbare Heterogenitäten auftreten, und die Teilflächen möglichst in Verbreitungsgebieten unterschiedlicher Standortregionaltypen liegen. Ein relativ homogenes Relief sollte zudem die Interpretation der Heterogenitäten erleichtern und das Spektralsignal unabhängiger von äußeren Einflüssen und geometrischen Verzerrungen machen (*Kap.: 5.4.3*). Die Informationen aus der topografischen Karte (TK 10) wurden für die Interpretation herangezogen. Bei den verwendeten Testschlägen handelt es sich um die in *Kap.: 4.4.2* beschriebenen Gebiete.

Die Testschläge wurden aus der Satellitenszene „ausgeschnitten“ und im GIS JENATOP mit den vektorisierten Klassengrenzen der RBS überlagert. Mit der Integration der beiden Datenebenen in dem GIS konnte eine vergleichende Analyse und Auswertung durchgeführt und die Daten für die Präsentation aufbereitet werden.

Die visuelle Analyse wurde sowohl mit linearisierten (*Kap.: 7.3.1*) Einzelkanaldarstellungen der verschiedenen verfügbaren Spektralbereiche, als auch mit den informativsten Farbkompositen durchgeführt. Die Kanäle für die informativsten RGB-Farbdarstellungen wurden anhand des OIF-Wertes (*Kap.: 7.4.2*) ermittelt. Dabei wurden mehrere der Kombinationsmöglichkeiten ausprobiert, denen in Tabelle 8 ein hoher Wert zugewiesen wurde, da je nach standörtlichen Gegebenheiten eine andere Kombination zu einer aussagefähigeren bzw. differenzierteren Darstellung führen konnte. Dies ist höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß der OIF-Wert aus den Ergebnissen der Korrelationsanalyse (*Kap.: 7.1.2*) des gesamten Subimage errechnet wurde und nicht aus den

Standardabweichungen und den Korrelationskoeffizienten jedes einzelnen Testschlages. Die Aussage über die informativste Kanaldarstellung gilt daher genau genommen nur für die Farbdarstellung des gesamten Subimages der Landsat-TM Aufnahme. Der OIF-Wert stellt aber eine gut geeignete Orientierungshilfe zur Wahl der Kanalkombination für die einzelnen Testschläge dar. Es war ebenfalls möglich, daß aufgrund des hohen Informationsgehaltes bestimmter Kanalkombinationen die räumliche Frequenz der Pixelfärbung zu hoch war, d.h. eine sehr große Heterogenität der Färbung benachbarter Pixel vorlag, um eine Interpretation anhand des verwendeten Kartenmaterials zu realisieren.

Die Auswertung der einzelnen spektralen Kanäle wird durch eine Signaturanalyse der heterogenen Flächen unterstützt. Für die Erstellung des Signaturdiagramms wurden in jedem der Teilbereiche 10 repräsentative Bildelemente als Meßpunkte aus den unbearbeiteten Landsat-TM Rohdaten ausgewählt und deren Grauwerte aufaddiert und gemittelt. Es wurden 10 Messungen getätigt, um lokale Schwankungen so weit wie möglich auszugleichen.

8.1.1.1 Analyse der Reflexionswerte von Schlag 203

Schlag 203, der vollständig in einem Löß-Schwarzerde Verbreitungsgebiet liegt (MMK), weist bei der Betrachtung der Farbkompositen von Landsat-TM Daten sowie von IRS-1C Daten deutlich erkennbare Unterschiede in der Farbgebung einzelner Bereiche auf. Man kann drei gut voneinander trennbare Farbbereiche unterscheiden, die sich teilweise mit der Karteninformation der RBS in Verbindung bringen lassen (*Anhang B Abb. - 8-9*).

Aufgrund der klimatischen Verhältnisse (*Kap.: 3.1.1*) kann eindeutig ausgeschlossen werden, daß diese Unterschiede auf verschiedene Feuchtigkeitsgehalte des Oberbodens zurückzuführen sind. Unterschiedliche Bearbeitung der Flächen läßt sich nach Sichtung des Fotomaterials und anhand der natürlichen Formgebung der differenzierten Bereiche ebenfalls ausschließen. Durch das homogen leicht abfallende Relief des Schlages, das keine Mulden oder Kuppen aufweist, ist diesbezüglich ebenfalls nicht von nennenswerter Schattenwirkung, die das objektspezifische Reflexionssignal modifiziert, auszugehen. Die unterschiedliche spektrale Signatur der Bereiche muß demnach von den vorhandenen Heterogenitäten der Bodeneigenschaften und -inhaltsstoffe herrühren.

Durch die Verknüpfung der Farbkomposite mit den Informationen der Reichsbodenschätzung ist es möglich, eine Beziehung der Farbgebung zu den Bodenwerten herzustellen. Die Areale mit den niedrigsten Bodenwerten dieses Schlages (32-65) lassen sich sowohl in den Daten des Landsat-TM (RGB 543), als auch in denen des IRS-1C (RGB 231), eindeutig als helle Flächen abgrenzen. Dieses Gebiet hebt sich zusätzlich in der Klasseneinteilung der RBS durch die Entstehungsart LÖV von dem restlichen Schlag (LÖ) ab.

Ein zweiter Bereich entlang der östlichen Feldgrenze, der sich in der Abbildung als dunklere Fläche von dem Großteil des Schlages abhebt, ist nach der Klasseneinteilung der RBS nicht abzugrenzen. Diese Fläche wird in der IRS-Darstellung sehr stark in einer dunklen Farbgebung hervorgehoben. In der Landsat-TM RGB 543 Abbildung wird der spektrale Unterschied nicht so eindeutig klar. Bei der Verwendung der TM-Kanäle 234, die dem IRS entsprechen, zeigt sich ein ebenfalls eindeutiges Bild. Daraus ergibt sich eine bessere Eignung dieses Kanaltuplets für eine informative RGB-Darstellung.

Die Betrachtung der Einzelkanaldarstellungen beider Systeme (*Anhang B Abb. B-1-4 und 5-7*) läßt ebenfalls die in der RGB-Darstellung mögliche Differenzierung zu. Mit Hilfe der Signaturanalyse der drei abgrenzbaren Teilbereiche (*Abb.: 16*) lassen sich genauere Aussagen über das Reflexionsverhalten dieser Flächen in den einzelnen spektralen Kanälen machen, die zur Interpretation herangezogen werden können. Das Bodensignaturdiagramm (*Abb.: 16*) zeigt in der Kurve „hell“ eindeutig eine stärkere Reflexion des Gebietes, welches in der RBS als LÖV mit niedrigen Bodenwerten gekennzeichnet wird (*Anhang B Abb. B-1-4*). Diese stärkere Reflexionsintensität existiert über den gesamten spektralen Aufnahmebereich des Landsat-TM, wobei der Unterschied zu den anderen Flächen im Bereich des MIR abnimmt. Im Aufnahmebereich des TM-3 besteht das größte Unterscheidungspotential zu den anderen Teilgebieten des Schlages.

Für den in der RGB-Darstellung dunkel abgebildeten Bereich (*Anhang B Abb. B-8 und 9*) zeigt die Signaturanalyse („dunkel“) nur einen geringen Unterschied in der Reflexionsintensität zu dem restlichen Schlag, dessen spektrale Eigenschaften im Signaturdiagramm anhand der Kurve „mittel“ dargestellt sind.

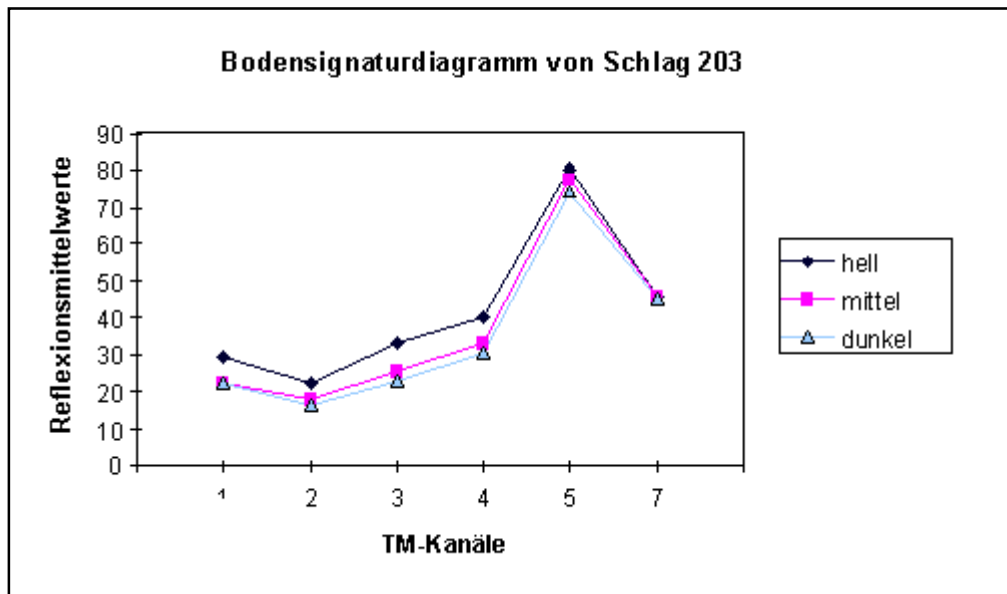


Abb. 16: Bodensignaturdiagramm von Schlag 203 (Landsat TM 22.09.1997).

Die Auswertung der Bodenkarte (*Kap.: 4.4.2.1*) deutet darauf hin, daß das Reflexionssignal in dem hellen Bereich nicht mehr von der Lößdeckschicht beeinflusst wird. Vielmehr ist auf dieser Teilfläche das durch Erosionsprozesse freigelegte, geologische Ausgangsgestein des unteren oder mittleren Keupers für die Reflexion der elektromagnetischen Strahlung als verantwortlich anzusehen. Die Schichten des unteren und mittleren Keupers weisen in der Regel hohe Carbonatgehalte auf (*Kap.: 4.2*), die sich in einer hohen Reflexionsintensität im VIS-Bereich zeigen (*Kap.: 6.1.1.3*). Diese erhöhte Reflexion wird durch das Signaturdiagramm (*Abb.: 16*) eindeutig gezeigt.

Aus diesem Analyseergebnis läßt sich ableiten, daß die Lokalisierung erodierter Teilflächen auf carbonatreichem Ausgangsgestein durchaus anhand von Landsat-TM und IRS-1C Daten realisierbar ist, und daß vor allem die spektrale Information aus dem VIS, aber auch aus dem NIR-Bereich des elektromagnetischen Spektrums, Hinweise diesbezüglich enthält. Diese Erosionserscheinungen, die als Feldheterogenitäten zu erkennen sind, können von beiden betrachteten Aufnahmesystemen mit einem ähnlich guten Ergebnis lokalisiert werden.

Die geringere Reflexion des dunkel dargestellten Bereichs läßt sich anhand der RBS nicht interpretieren, da die Fläche gleiche Bodenwerte und Ausgangsmaterialien wie der Rest des Schlages aufweist. Die Zuhilfenahme topografischer Information liefert ebenfalls keine weiteren Erkenntnisse für die Deutung dieses spektralen Unterschiedes. Eine Interpretation

dieser Heterogenität kann nur über eine erweiterte Datengrundlage auf der Basis von Bodenproben erfolgen, die Aufschluß über die räumliche Verteilung und Gehaltsmengen weiterer reflexionswirksamer Bodeneinhaltsstoffe liefern.

Bei der kombinierten Betrachtung der einzelnen Aufnahmen und der RBS wird deutlich, daß der raumbezogene Informationsgehalt der Satellitendaten für diesen betrachteten Schlag durchaus höher einzustufen ist, als der Informationsgehalt der Bodenkarte. Der helle, stärker reflektierende Bereich, der als stark carbonathaltig interpretiert wird, hat eine größere räumliche Ausdehnung, als der in der RBS angegebene LöV-Bereich. Auf Grundlage der Interpretation ist davon auszugehen, daß auch an den anderen hellen Stellen in den Einzelkanaldarstellungen des Schlages das carbonathaltige, geologische Ausgangsgestein seine Reflexionswirksamkeit an der Bodenoberfläche entfaltet. Diese Vermutung konnte im Rahmen der Untersuchungen nicht überprüft werden. Sollte sie sich jedoch als richtig erweisen, so lassen sich mit der Integration von Fernerkundungsinformationen in die Standortanalyse genauere, flächenkonkretere Aussagen im Hinblick auf erodierte Flächen erstellen, als es mit ausschließlicher Verwendung der Karteninformation möglich ist.

8.1.1.2 Analyse der Reflexionswerte von Schlag 205

Der Schlag 205 liegt in unmittelbarer Nachbarschaft zu dem oben dargestellten Schlag 203 und befindet sich ebenfalls vollständig im durch die MMK als Löß-Schwarzerde-Gebiet ausgewiesenen Bereich (*Kap.: 4.4.2.2*). Die RBS weist für diesen Schlag zwei verschiedene, stärker differenzierte Teilbereiche aus: Zum einen gibt es einen LöV-Bereich mit geringeren Bodenwerten, der in seinen Eigenschaften dem in *Kapitel 8.1.1.1* analysierten hellen Teilbereich entspricht. Zum anderen weist die RBS einen in den Bodenwerten nahezu homogenen Lö-Bereich aus (*Anhang C Abb. C-1-4*).

Ein Teil des in der RBS als LöV ausgewiesenen Areals hebt sich wie bei Schlag 203 eindeutig durch eine helle Farbgebung in den RGB- (*Anhang C Abb. C-5-6*) und den Einzelkanaldarstellungen (*Anhang C Abb. C-1-4*) von dem Rest des Schlages ab. Die Begründung dieser spektralen Heterogenität ist wie bei Schlag 203 in dem carbonatreichen Ausgangsgestein, welches das Reflexionssignal beeinflusst, zu sehen. Die verstärkte Reflexion über den gesamten Aufnahmebereich, und insbesondere in den Kanälen TM-3 und TM-4, läßt sich aus dem Verlauf der Reflexionssignaturkurve entnehmen, die im Bodensignaturdiagramm

mit „hell“ bezeichnet ist. Die geringere Reflexionsintensität der anderen LöV-Areale in den Kanälen TM-3 und TM-4 (*Anhang C Abb. C-1-2*) deutet darauf hin, daß auf diesen Flächen der Erosionsprozeß noch nicht in einem so starken Maße fortgeschritten ist, und noch eine Lößdeckschicht existiert, die das Reflexionssignal dominierend beeinflusst. Diese geringere Reflexionsintensität ist in der Signaturkurve „mittel“ eindeutig zu sehen (*Abb.:17*).

Das Interessante an diesem Testgebiet ist seine Homogenität in der Klassenausweisung der RBS. Der als homogen ausgewiesene Lö-Bereich wird in der RGB-Darstellung 543 der TM-Daten (*Anhang C Abb. C-5*) in zwei, und in der RGB-Darstellung der IRS-Daten (*Anhang C Abb. C-6*) in drei verschiedene Farbklassen eingeteilt. Er umfaßt die spektrale Signatur der lößbedeckten LöV-Areale („mittel“) und eine davon abweichende spektrale Klasse, die in der Reflexionskurve „dunkel“ abgebildet ist (*Abb.: 17*). Diese Heterogenität der spektralen Eigenschaften zeigt sich auch in den linearisierten Einzelkanalдарstellungen beider Systeme.

Diese Ausweisung heterogener Teilbereiche macht deutlich, daß in den Fernerkundungsdaten der beiden Aufnahmesysteme durchaus Information über die räumliche Verteilung bestimmter Eigenschaften an der Bodenoberfläche enthalten ist, welche in der RBS nicht enthalten sind.

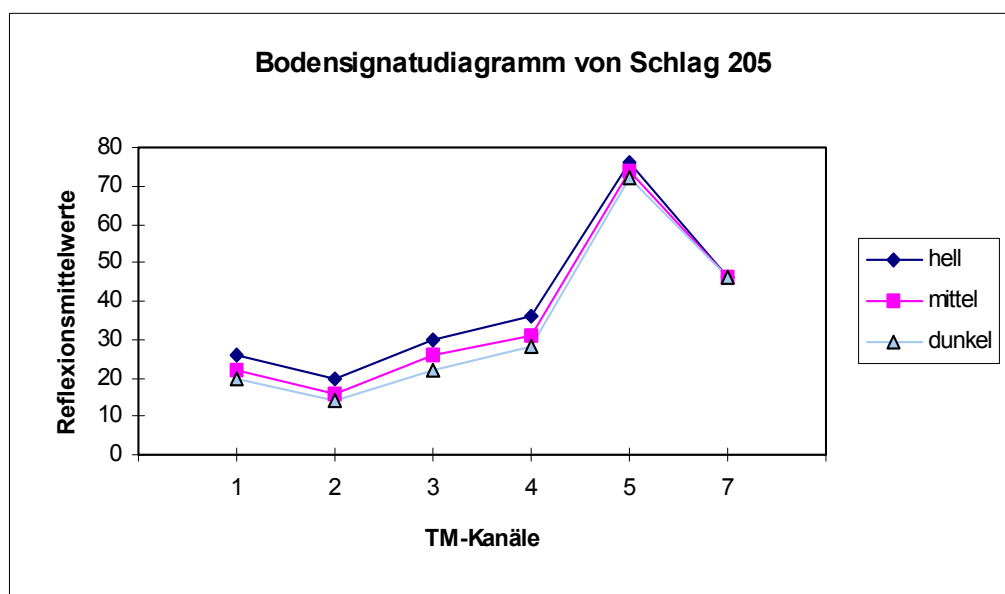


Abb. 17: Bodensignaturdiagramm von Schlag 205 (Landsat TM 22.09.1997).

Die beiden spektral differenzierbaren Teilbereiche der Lö-Klasse zeigen besonders im VIS-Bereich signifikante Unterschiede in ihrer Reflexionsintensität, wie es in dem Bodensignaturdiagramm (*Abb.: 17*) zu erkennen ist (mittel/dunkel). Dieser Unterschied im

Spektralverhalten läßt aufgrund der in *Kapitel 6* erarbeiteten Kenntnisse vermuten, daß er durch einen variierenden Humusgehalt an der Bodenoberfläche hervorgerufen wird, der seine Reflexionswirksamkeit insbesondere im roten und nahen infraroten Spektralbereich entfaltet (*Kap.: 6.1.1*), oder daß das carbonatreiche Ausgangsgestein im „mittel“ Gebiet, wie bei den LöV-Bereichen, näher an der Bodenoberfläche ansteht, und seine Reflexionswirksamkeit teilweise zum Tragen kommt.

Die spektrale Heterogenität muß aufgrund der topografischen Homogenität, der klimatischen Gegebenheiten und des einheitlichen Bearbeitungszustandes durch die reflexionswirksamen Bodenparameter an der Bodenoberfläche verursacht werden. Aufgrund fehlender weiterer Bodendaten läßt sich über die Ursache keine konkretisierende Aussage vornehmen. Es ist jedoch offensichtlich, daß Unterschiede im spektralen Verhalten der Teilflächen vorliegen, die durchaus auch pflanzenproduktionsrelevante heterogene Standorteigenschaften darstellen können (z. B. Humusgehalt). Die spektrale Aufzeichnung zeigt für den betrachteten Schlag in jedem Fall ein räumlich differenzierteres Abbild des Bodens, als in der Klasseneinteilung der Reichsbodenschätzung ausgewiesen wird, auch wenn es an gesicherten Aussagen über die Ursachen dieser Heterogenitäten mangelt.

8.1.1.3 Analyse der Reflexionswerte von Schlag 304

Der Schlag 304 liegt laut MMK ebenfalls vollständig in einem Löß-Schwarzerde-Bereich. In der RBS wird im südlichen Bereich des Schlages ein schmales Band als Verwitterungsboden (V) gekennzeichnet, und ein kleinflächiges Gebiet am nordwestlichen Rand des Schlages der Entstehungsart LöV zugewiesen (*Kap.: 4.4.2.4*).

In der RGB-Darstellung (754) der Landsat-TM Daten (*Anhang D Abb. D-5*) werden drei Bereiche des Schlages in einer differenzierten Farbgebung dargestellt: Der Großteil des Schlages, der in etwa der Ausdehnung der RBS-Klasse „Lö“ entspricht, hat eine gelbliche Färbung. Im Bereich des in der RBS ausgewiesenen Verwitterungsbodens im Süden des Schlages liegt ein Streifen hellgrüner Färbung vor. Dieser deckt sich in seiner räumlichen Ausdehnung nicht vollständig mit dem Bereich in der RBS, aber steht mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mit diesen in Verbindung. Das dritte farblich differenzierte Gebiet liegt im Norden des Schlages und ist dunkel gefärbt. Dieses Areal liegt geografisch im Bereich des

in der RBS als LÖV klassifizierten Raums. Der dunkel gefärbte Bereich zeigt ebenfalls eine weitaus größere Ausdehnung, als der ihm zugeordnete LÖV-Bereich in der RBS.

Diese grobe Klasseneinteilung der Farbdarstellung mittels der Landsat-TM Daten ist in gleicher Weise in der RGB-Darstellung der IRS-Daten (*Anhang D Abb. D-6*) zu erkennen, wobei die nördliche Klasse nur eine minimale Ausdehnung aufweist.

Für die drei erwähnten Teilbereiche des Schlages 304 wurde eine Signaturanalyse der Landsat-TM Daten durchgeführt, welche Informationen zur inhaltlichen Interpretation der Heterogenitäten liefert. Aus der Analyse der Reflexionsintensitätswerte (*Abb.: 18*) zeigt sich für den hellgrünen Bereich, der den Verwitterungsböden zugeordnet wird, eine eindeutig höhere Reflexion über den gesamten Spektralbereich von 0.45-2.35 μm als für den Rest des Schlages (gelblicher Bereich). Die Differenz zwischen den Reflexionswerten ist besonders im sichtbaren Spektrum sehr hoch und nimmt mit zunehmender Wellenlänge ab. Diese spektrale Signatur der Fläche resultiert mit hoher Wahrscheinlichkeit von den stark carbonathaltigen, verwitterten Keuperschichten, die für diesen Bereich in der RBS als geologisches Ausgangsmaterial der Bodenentwicklung ausgewiesen sind. Sollte die Vermutung, daß der Carbonatgehalt des Oberbodens für die Reflexionsunterschiede verantwortlich ist, richtig sein, so bleibt offen, weshalb der Boden auch in dem MIR erhöhte Reflexionswerte aufweist. Die Ursache kann jedoch nur über eine Analyse der Bodenparameter ermittelt werden.

In den linearisierten Einzelkanaldarstellungen des Landsat-TM (*Anhang D Abb. D-1-4*) sind diese unterschiedlichen Reflexionswerte nur im Kanal des nahen Infrarots gut zu erkennen, was möglicherweise auf den verwendeten Linearisierungsalgorithmus von JENATOP zurückzuführen ist, oder aber auf einer sehr geringen spektralen Differenz beruht. In den spektralen Kanälen des IRS-1C zeigt sich dieser Unterschied ebenfalls nur eindeutig im Bereich des NIR.

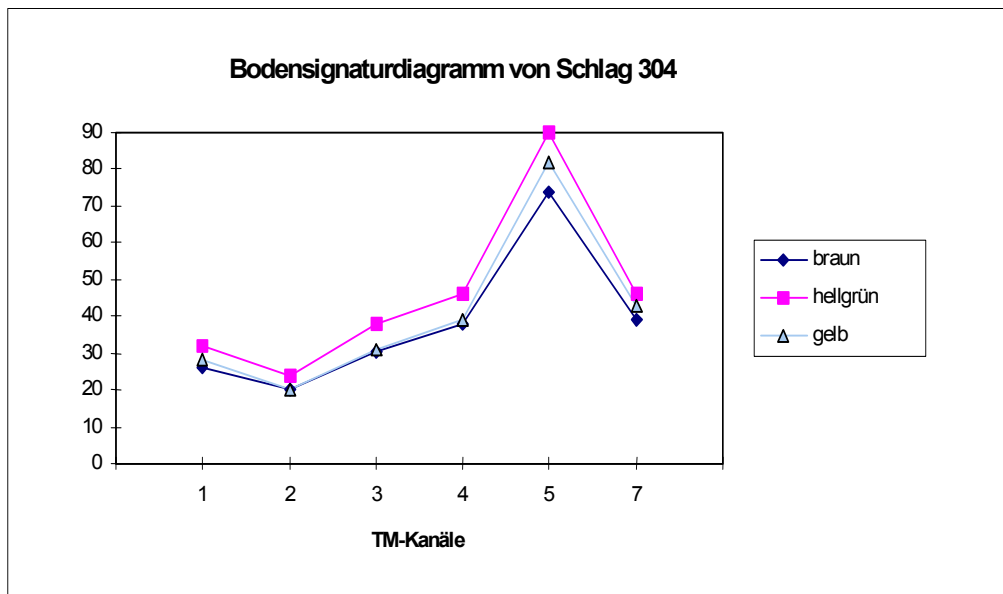


Abb. 18: Bodensignaturdiagramm von Schlag 304 (Landsat TM 22.09.1997).

Die Fernerkundungsdaten zeigen für die hellgrüne Klasse eine größere räumliche Ausdehnung, als die RBS für den Bereich des Verwitterungsbodens ausweist. Die spektrale Information, die durch die Fernerkundung bereitgestellt wird, stellt demnach in Bezug auf die räumliche Verteilung des carbonathaltigen Oberbodens eine informativere Datenebene dar, als es die vorhandene Bodenkarte leistet (vgl. *Kap.: 8.1.1.1*).

Die in der Farbdarstellung (*Anhang D Abb. D-5 und 6*) und in den Einzelkanalabbildungen (*Anhang D Abb. D-1-4*) beider Aufnahmesysteme dunkel abgebildete Fläche zeigt in der Signaturanalyse für den VIS- und den NIR-Bereich nahezu keinen Unterschied in der Reflexionsintensität zu dem gelblich gefärbten Hauptgebiet des Schlages. In den linearisierten Einzelkanalдарstellungen des Landsat-TM erscheint diese Reflexionswertdifferenz höher. Diese Diskrepanz kann möglicherweise auf eine schlechte Wahl der Meßpunkte zurückzuführen sein, oder aber durch den zugrundeliegenden Algorithmus der Linearisierung verursacht werden (vgl. *Kap.: 7.3.1*).

Unterschiede in der Reflexionsintensität zwischen der dunkel und der gelblich gefärbten Klasse werden nur im Bereich des MIR (*Abb.: 18*) deutlich, in dem die nördliche, dunkle Fläche („braun“) deutlich geringere Reflexionswerte zeigt als der restliche Schlag („gelb“). Dieser Zusammenhang zwischen dem mittleren Infrarotbereich und der betreffenden

Teilfläche erklärt auch, warum dieser Bereich in der Farbdarstellung des IRS-1C kaum dargestellt wird.

Aufgrund der Analyse der Reflexionswerte läßt sich die Aussage formulieren, daß der Parameter, der für diesen Reflexionsunterschied verantwortlich ist, nur im MIR deutlich zu erkennen ist. Für die Lokalisierung derartiger Heterogenitäten stellt der Landsat-TM aufgrund der beiden in diesem spektralen Bereich aufnehmenden Kanäle das informativere Aufnahmesysteme dar.

Die stärkere Absorption der Fläche in den Aufnahmekanälen des mittleren Infrarotbereichs bedeutet, daß in dem Boden vermehrt Stoffe enthalten sein müssen, die eine starke absorbierende Wirkung im MIR haben. Die Absorption kann zum einen aus einem vermehrten Anteil von Tonmineralien resultieren, die besonders in dem MIR reflexionsmindernd wirken (*Kap.: 6.1.1.7*), und zum anderen durch einen vermehrten Humusanteil verursacht werden, der über das gesamte spektrale Spektrum absorbierend wirkt (*Kap.: 6.1.1.1*). In dieser Spektralregion wirkt sich auch der Einfluß der Bodenfeuchte reflexionsdämpfend aus (*Kap.: 6.1.2.1*). Diese Beeinflussung wurde aber aufgrund der klimatischen Situation vor dem Aufnahmezeitpunkt vernachlässigt (*Kap.: 3.1.1*)

Aus der Bodenkarte läßt sich keine genaue Information über die Bodeninhaltsstoffe entnehmen. Ob die in dem Bereich des dunklen Areals ausgewiesene LöV-Fläche (RBS) mit der gedämpften Reflexion in Zusammenhang steht, kann anhand des vorliegenden Datenmaterials nicht geklärt werden. Eigentlich wäre davon auszugehen, daß das geologische Ausgangsgestein in diesem Landschaftsraum carbonathaltig ist (*Kap.: 4.2*) und eine verstärkte Reflexion bewirkt (s. o.) und somit nicht für die verstärkte Absorption der Strahlung verantwortlich ist. Für die Klärung dieser Frage sind nähere Informationen über die Bodentextur und die reflexionswirksamen Bodeninhaltsstoffe notwendig, die im Rahmen der Arbeit nicht erhoben werden konnten.

Auch bei der Betrachtung dieses Schlages und der in der Satellitenaufnahme aufgezeigten Heterogenitäten zeigt sich ein anderer Informationsgehalt gegenüber der Reichsbodenschätzung. Man kann nicht direkt sagen, daß die spektrale Aufnahme mehr Information enthält als die Bodenkarte, doch ist zu erkennen, daß sie eine weitere Informationsebene mit anderer Information darstellt.

8.1.1.4 Analyse der Reflexionswerte von Schlag 414

Die Reichsbodenschätzung weist für den Großteil des Schlages ein heterogenes Nebeneinander von LÖV- und Verwitterungsböden (V) aus, in denen der Lehm als dominierende Bodenart vorliegt. Das Ergebnis der TM-574-Farbdarstellung (*Anhang E Abb. E-8*) zeigt fast den gesamten Schlag als einen dunkelgrünen Bereich, der in seiner räumlichen Lage mit dem als V und LÖV gekennzeichneten Gebiet identisch ist. Innerhalb der ausgewiesenen Fläche bestehen zusätzliche Heterogenitäten in der spektralen Reflexion, die jedoch nicht mit der ebenfalls sehr heterogenen Klasseneinteilung der RBS in Verbindung gebracht werden können.

Die südliche Spitze des Schlages grenzt sich in dem Kartenwerk durch einen höheren Sandanteil in der Bodenart und der Lößdominanz von der restlichen lehmdominierten Schlagfläche ab (*Kap.: 4.4.2.5*). Diese Bodenheterogenität schlägt sich auch in dem spektralen Reflexionsverhalten dieses Teilgebietes nieder, das sich durch eine hellgrüne Farbgebung in der Farbkomposite des Landsat-TM (*Anhang E Abb. E-8*) abhebt. In den Einzelkanaldarstellungen (*Anhang E Abb. E-1-4*) zeigt sich insbesondere im MIR (*Anhang E Abb.: E-3-4*) eine höhere Reflexionsintensität. Die Karteninformation und die spektrale Aufzeichnung der Landsat-TM Daten zeigen eine nahezu exakte Übereinstimmung in der räumlichen Lage dieser Heterogenität. Die Aussagen des Kartenwerkes hinsichtlich der Bodenart lassen sich demnach durchaus auch in den digitalen Fernerkundungsdaten erkennen.

Anders sieht der Informationsgehalt der IRS-1C Daten aus. In der Farbdarstellung der IRS-1C Kanäle (*Anhang E Abb. E-9*), sowie in den Einzelkanaldarstellungen (*Anhang E Abb. E-5-7*), ist diese Flächenabgrenzung nicht zu erkennen. Aufgrund des Fehlens spektraler Information aus dem MIR-Aufnahmebereich besteht im Hinblick auf die Bodenart ein Informationsdefizit.

Daß die unterschiedliche Aussage der beiden Aufnahmesysteme in den jeweiligen Farbdarstellungen auf einem signifikanten Unterschied im Reflexionsverhalten der beiden Teilbereiche im Spektrum des mittleren Infrarots beruht, wird durch die Auswertung der Signaturanalyse (*Abb.: 19*) beider Teilgebiete unterstrichen. Wie anhand der Signaturkurven der Landsat-TM Daten zu sehen ist, zeigt sich im VIS kein relevanter Unterschied in der Reflexionsintensität der beiden Teilbereiche. Im NIR ist eine gering höhere Reflexion des südlichen Teilgebietes zu registrieren. Die Differenz in der Reflexionsintensität beider

Gebiete erreicht in Kanal TM-5 den maximalen Wert und behält diesen nahezu bis in den Aufnahmebereich des TM-7 bei.

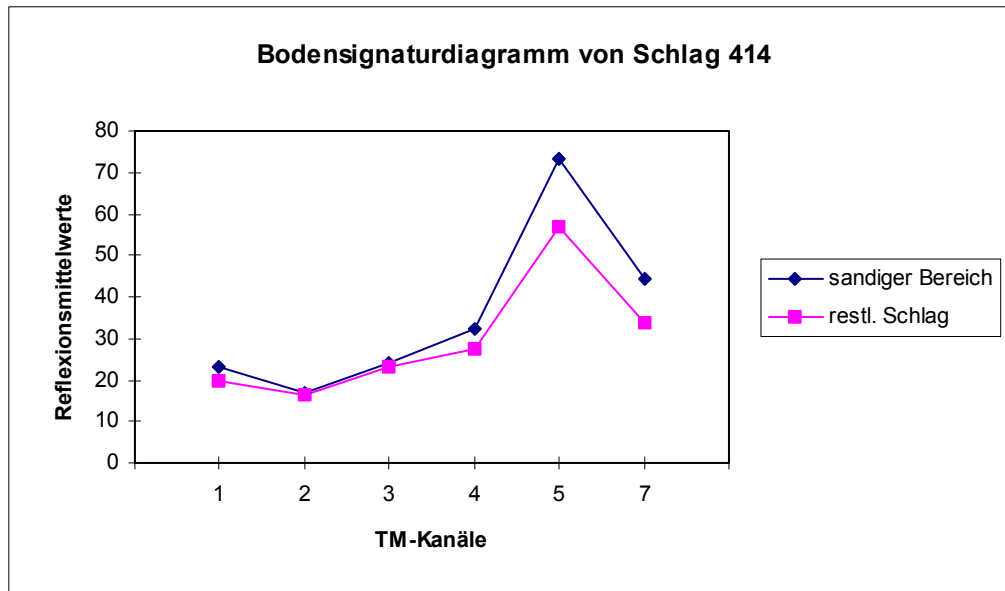


Abb. 19: Bodensignaturdiagramm von Schlag 414 (Landsat TM 22.09.1997).

Diese eindeutige Korrelation des Reflexionsverhaltens mit dem mittleren infraroten Aufnahmespektrum muß nach der Interpretation der vorhandenen *Ground truth* Daten mit der unterschiedlichen Bodenart in Verbindung stehen, da unterschiedliche topografische und klimatische Beeinflussungen ausgeschlossen werden können. Auch ein möglicher Einfluß von Humus (Kap.: 6.1.1.1) oder Carbonat (Kap.: 6.1.1.3) auf die Reflexion kann aufgrund fehlender Reflexionsunterschiede im VIS aller Wahrscheinlichkeit nach außer acht gelassen werden.

Laboruntersuchungen zufolge haben grobkörnigere Böden (z. B. Sand) eine geringere Reflexion als feinkörnige Substrate (z. B. Lehm). Die in Kapitel 6.1.1.4 behandelten Reflexionseigenschaften der verschiedenen Bodentexturen unter „natürlichen“ Bedingungen zeigen aber, daß in diesem Fall sandige Böden in der Regel stärker reflektieren als lehmige Böden. Dieser Zusammenhang könnte eine Erklärung für die höhere Reflexion des südlichen, sandhaltigen Areals sein. Eine gesicherte Aussage läßt sich nur über weitere Bodendaten vornehmen, die für die Arbeit nicht zur Verfügung standen.

8.1.1.5 Analyse der Reflexionswerte von Schlag 704

Die RGB-Darstellung aus den TM-Kanälen 574 zeigt eine deutliche Heterogenität in dem spektralen Verhalten der Bodenoberfläche des Schlages. Im nordwestlichen Teilbereich des Schlages wird ein Areal in einer dunkleren Farbe von dem restlichen Schlag abgegrenzt (*Anhang F Abb. F-5*). Dieses dunkle Gebiet läßt sich wiederum in zwei Bereiche differenter Farbgebung und damit spektraler Eigenschaft trennen, indem der Kernbereich in einem noch dunkleren Farbton dargestellt wird.

Diese Heterogenität in der nordwestlichen Ecke des Schlages 704 wird durch die MMK sowie die RBS bestätigt, die für diesen Bereich eine Ton-Rendzina mit teilweise dominantem Tonanteil ausweisen, bestätigt. Das in der Farbdarstellung besonders dunkel gekennzeichnete Kerngebiet stimmt in der räumlichen Lage nahezu exakt mit der in der RBS als tondominiert ausgewiesenen Fläche überein. Es ist daher mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, daß der Unterschied im Spektralverhalten dieser Fläche durch den erhöhten Tonanteil im Boden verursacht wird. Die spektrale Signatur des Bodens ist der Signaturkurve „dunkel“ im Bodensignaturdiagramm zu entnehmen (*Abb.: 20*). Sie zeigt, daß besonders in den Kanälen TM-5 und TM-7 differenzierende Information gegenüber den beiden anderen Bereichen des Schlages enthalten ist, da in diesem Aufnahmebereich die größten Unterschiede in der Reflexionsintensität der Flächen vorliegen. Diese Differenzen in der Reflexionsintensität sind in den Einzelkanalardarstellungen ebenfalls deutlich zu erkennen (*Anhang F Abb. F-1-4*).

Der das Kerngebiet umgebene Verwitterungsbodenbereich zeigt gegenüber dem als Lößbereich ausgewiesenen Teilschlag (*Anhang F Abb. F-5*) ebenfalls ein verändertes Reflexionsverhalten. Aus der Signaturkurve „mittel“ in der Abbildung (*Abb.: 20*) läßt sich ersehen, daß der Unterschied ebenfalls insbesondere im Bereich des mittleren Infrarots zu identifizieren ist. In den Aufnahmekanälen des VIS stellt sich der Unterschied in der Reflexionsintensität nur minimal dar und läßt eine Differenzierung schwierig erscheinen. Dies macht die Farbdarstellung der IRS-Daten deutlich, in der dieser Übergangsbereich („mittel“) kaum dargestellt wird (*Anhang F Abb. F-6*). Auch der dunklere Bereich erscheint in einem geringeren Umfang.

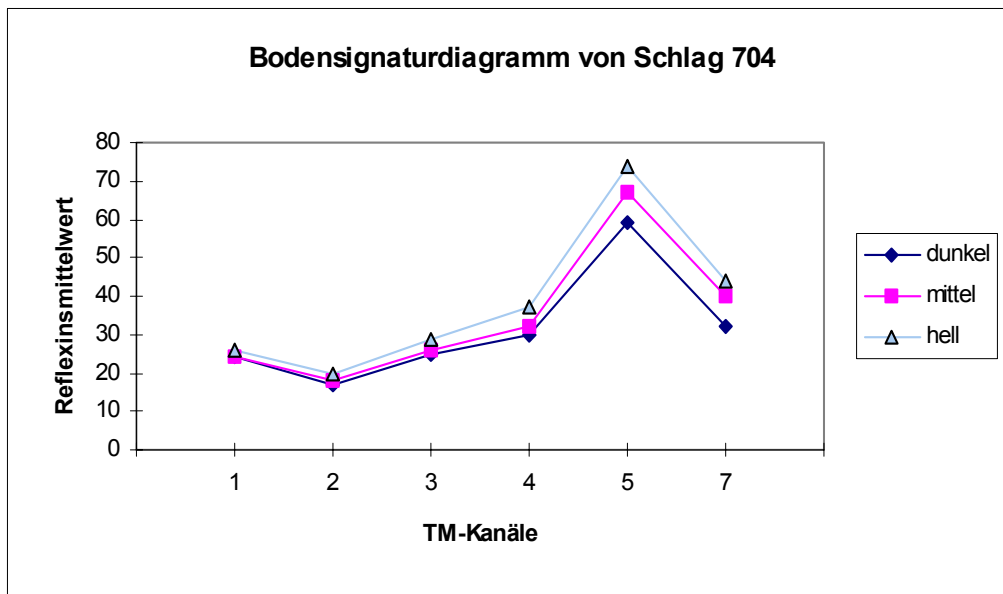


Abb. 20: Bodensignaturdiagramm von Schlag 704 (Landsat TM 22.09.1997).

Auffällig ist, daß die Reflexionsintensität der Lößflächen (Signaturkurve „hell“ in *Abb.: 20*) über die gesamte betrachtete spektrale Bandbreite höher ist, als die der Ton-Rendzina-Gebiete. Das verwitterte geologische Ausgangsgestein ist stark Carbonathaltig, so daß auch in dem darauf entwickelten Boden ein hoher Carbonatgehalt zu erwarten ist. Die sehr geringe Reflexion dieser Teilflächen im sichtbaren Aufnahmebereich deutet jedoch darauf hin, daß das Carbonat auf diesen Flächen nicht reflexionswirksam ist. Die reflektierende Wirkung muß vielmehr von einer entkalkten tonig-lehmigen Deckschicht ausgehen, wofür auch die stärkere Absorption gegenüber den lehmigen Lößflächen im MIR sprechen würde. Die landwirtschaftlichen Nutzflächen Deutschlands unterliegen in der Regel einer Carbonatauswaschung, die zu einer oberflächlichen Entkalkung führt (vgl.: *Kap.: 6.1.1.3*).

8.1.1.6 Analyse der Reflexionswerte von Schlag 706

Der Schlag 706 ist in seiner Reflexionsintensität sowohl in der RGB- (*Anhang G Abb. G-5*), als auch in den Einzelkanaldarstellungen (*Anhang G Abb. G-1-4*) in zwei Bereiche – einen östlichen und einen westlichen - zu unterteilen, die durch eine „harte“ Grenze getrennt werden. In der Bodenkarte jedoch werden für beide Teilgebiete nahezu die gleichen Bodenklassen ausgewiesen, so daß nicht in den vorhandenen Bodenparametern die Ursache für die Reflexionsunterschiede zu vermuten ist. Die Einzelkanal- und die Farbdarstellungen beider Aufnahmesysteme zeigen eine deutlich stärkere Reflexion des östlichen Teilbereiches.

Dieser Unterschied in der Reflexionsintensität wird bei der Betrachtung der Signaturkurven (Abb.: 21) ebenfalls deutlich. Die Reflexion des westlichen Gebietes ist über die gesamte spektrale Bandbreite geringer, wobei die Differenz ihren maximalen Wert im Aufnahmebereich des TM-5 hat.

Über die Ursache dieser enormen Reflexionsvarianz beider Flächen kann nur eine Vermutung aufgestellt werden. Aufgrund der scharfen Grenze, die sich nicht in der Verteilung der Bodenklassen der RBS oder der MMK wiederfindet, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem unterschiedlichen Bearbeitungsstand der beiden landwirtschaftlichen Nutzflächen auszugehen, der das spektrale Verhalten unterschiedlich beeinflusst. In Kapitel 6.1.2.2 wurde beschrieben, daß gerade frisch gepflügte Flächen aufgrund ihrer starken Oberflächenrauigkeit ein höheres Absorptionsvermögen aufweisen als bereits geglättete oder noch nicht bearbeitete Standorte.

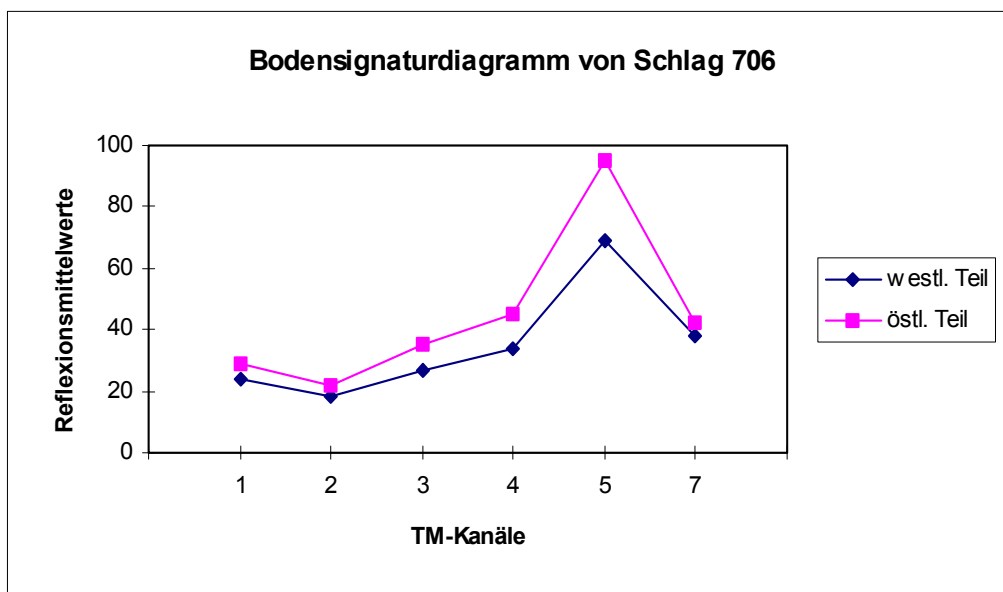


Abb. 21: Bodensignaturdiagramm von Schlag 706 (Landsat TM 22.09.1997).

Sollte diese Vermutung richtig sein, was sich im Rahmen der Arbeit nicht überprüfen ließ, wird deutlich, welchen großen Einfluß der Bearbeitungsstand des Bodens auf sein Reflexionssignal hat, und wie stark eine Klassifikation unterschiedlicher Bodenparameter dadurch beeinflusst und verfälscht werden kann.

Des weiteren liegt in beiden Teilbereichen ein heterogenes Nebeneinander von Löß- und Verwitterungsböden vor. Es ist jedoch nicht möglich, die vorhandenen spektralen räumlichen

Verteilungsmuster visuell dem Bodenmuster zuzuordnen (*Anhang G Abb.G-5*). Aus diesem Grund wird für diesen Schlag auf eine weitere Bodensignaturanalyse der verschiedenen spektralen Teilbereiche verzichtet.

8.1.1.7 Analyse der Reflexionswerte von Schlag 809

Die Fläche des Schlages 809 befindet sich vollständig in dem Verbreitungsgebiet der Verwitterungsböden. Der Hauptbereich wird den Lehm-Schwarzerden zugeordnet (*Kap.: 4.4.2.8*), nur das nordwestliche Areal ist von der Ton-Rendzina dominiert (MMK). In dem nordwestlichen Areal weist auch die RBS eine signifikante Heterogenität in ihrer Klassenbezeichnung auf. Im Gegensatz zu dem restlichen Schlag ist hier der Ton (T), sowie schwerer Lehm (LT) als dominierende Bodenart vertreten, und es liegen erheblich niedrigere Bodenwerte vor.

In der Farabbildung der TM-Kanäle 543 (*Anhang H Abb. H-5*) wird diese heterogene Fläche eindeutig wiedergegeben, wobei sie in den Daten des IRS-1C nicht dargestellt wird. Die Einzelkanaldarstellungen TM-Aufnahmekanäle (*Anhang H Abb. H-1-4*) zeigen, daß in den Kanälen des VIS und auch des NIR nur geringe Unterschiede im Reflexionsverhalten des tonhaltigen Bereichs gegenüber dem restlichen Schlag existieren. Die Signaturanalyse bestätigt diesen optischen Eindruck jedoch recht deutlich. In der Abbildung der Signaturkurven (*Abb.: 22*) ist eindeutig zu erkennen, daß bis zum MIR-Bereich nur geringe Abweichungen im spektralen Verhalten bestehen. Die Aufnahmekanäle TM-5 und TM-7 zeigen dagegen große Differenzen in der Reflexionsintensität der beiden Teilbereiche und deuten auf ein größeres Absorptionsvermögen des tonhaltigen Teilgebietes für dieses elektromagnetische Teilspektrum hin. Aufgrund der Erkenntnisse aus *Kapitel 6.1.1.5* ist davon auszugehen, daß der erhöhte Tonanteil für die verstärkte Absorption im MIR verantwortlich ist.

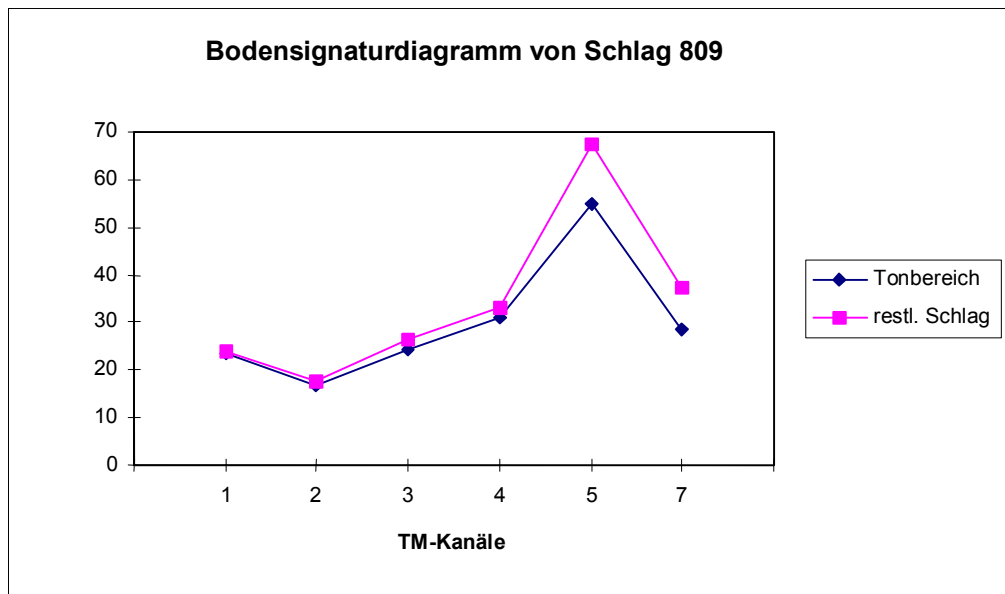


Abb. 22: Bodensignaturdiagramm von Schlag 809 (Landsat TM 22.09.1997).

Die Zusammenhänge zwischen den geringeren Reflexionswerten im MIR und dem tonhaltigen Boden bestätigen exakt die Auswertungsergebnisse von Schlag 704 (s. o.). Durch dieses Ergebnis wird eindeutig gezeigt, daß im Bereich des mittleren infraroten Aufnahmespektrums ein Informationspotential für die Lokalisierung und Flächenabgrenzung tonhaltiger Böden existiert. Da dem IRS-1C ein Aufnahmekanal in diesem elektromagnetischen Spektrum fehlt, kann ihm nicht so ein hohes Informationspotential im Rahmen der Bodenfernerkundung zugesprochen werden, wie dem Landsat-TM.

8.1.2 Automatische Klassifikation der Testgebiete

Da in der Praxis eine flächendeckende Datenerfassung der Standortgegebenheiten aller landwirtschaftlichen Nutzflächen aufgrund der entstehenden Datenmengen, sowie dem daraus resultierenden Kosten- und Arbeitsaufwand ausscheidet, müssen repräsentative Gebiete definiert werden, für welche die für ein Teilschlagmanagement relevanten Standortparameter erhoben werden. Eine Abgrenzung dieser Stichprobengebiete kann über deren spektrales Reflexionsverhalten erfolgen. In ihren spektralen Eigenschaften homogene Flächen dienen dabei als Gebiete, in denen stichprobenartige Bodenuntersuchungen durchgeführt werden können, aus deren punktbezogenen Ergebnissen dann auf die gesamte, spektral homogene Klassenfläche geschlossen werden kann. Diese Übertragung der Bodendaten auf andere

Gebiete der gleichen spektralen Klasse ist natürlich nur für die reflexionswirksamen Parameter und die mit ihnen korrelierenden Bodeneigenschaften legitim.

Die Abgrenzung der Teilflächen durch die visuelle Interpretation (*Kap.: 8.1.1*) folgt in der Regel subjektiven Einschätzungen und ist abhängig von der Fähigkeit des Betrachters, Grautöne bzw. Farbnuancen unterscheiden zu können. Für eine eindeutige, objektive Abgrenzung der im Spektralverhalten heterogenen Teilflächen eines Schlages wird von der Möglichkeit der computergestützten, unüberwachten Klassifikation Gebrauch gemacht. Das Ziel der automatischen Klassifikation ist es, verschiedene Flächen gleicher spektraler Eigenschaften innerhalb eines Schlages abzugrenzen, die als spektral homogene Teilgebiete unterschiedlicher Eigenschaften betrachtet werden können und potentielle Stichprobengebiete sind.

Die Klassifikation wurde mit den unbearbeiteten, geokodierten Originaldaten der beiden Aufnahmesysteme durchgeführt, wobei die Kanäle des VIS in atmosphärenkorrigierter Form (*Kap.: 7.3.2*) zur Anwendung kamen. Für die Klassifikation der einzelnen Schlagflächen wurden diese Gebiete mit dem Programm JENATOP aus dem Subimage „ausgeschnitten“ und als sechs- (Landsat-TM), bzw. dreidimensionaler (IRS-1C) Merkmalsraum in das Klassifikationsprogramm von PCI integriert (*Kap.: 7.5*). In der PCI-Fernerkundungssoftware stehen drei verschiedene unüberwachte Klassifikatoren zur Verfügung, deren theoretische Hintergründe in Kapitel 7.5.1 näher erläutert wurden.

Als Vorbereitung für die Klassifikation wurden an dem Schlag 203 verschiedene Testklassifikationen mit den einzelnen Klassifikatoren ausprobiert, um deren Anwendbarkeit für die Fragestellung zu überprüfen. Die Grundlage der Eignungsbewertung stellt die visuell mögliche Flächenabgrenzung (*Kap.: 8.1.1*) dar, die mindestens durch den Klassifikator erreicht werden muß. Die Anzahl der gewünschten Ergebnisklassen kann bei allen Klassifikatoren vor dem Klassifikationsdurchlauf festgelegt werden. Für die Testklassifikation mit den Daten von Schlag 203 wurden vier Klassen gefordert. Diese Menge entspricht in etwa der visuell abgrenzbaren Klassenanzahl.

Die Klassifikationsergebnisse der drei Klassifikatoren stellen sich sehr unterschiedlich dar. Die gewünschte Anzahl der Ergebnisklassen wurde nur mit dem *Fuzzy-K-means* Klassifikator realisiert. Die beiden anderen Methoden hingegen klassifizieren den Schlag nicht in drei

Teilbereiche differenter spektraler Eigenschaft, wobei es unerheblich war, wieviele Ergebnisklassen vorgegeben wurden. Die *K-means* Methode klassifizierte zwar unterschiedliche Bereiche, aber nicht in der vorher festgelegten Anzahl. Der *Isodata* Klassifikator dagegen unterteilte die Schlagflächen in gar keine unterschiedlichen Klassen.

Aufgrund dieser Testergebnisse wird der *Fuzzy-K-means* Klassifikator für die Klassifikation der restlichen Schläge ausgewählt und angewendet. Je nachdem, wieviele Ergebnisklassen gefordert werden, entsteht ein mehr oder weniger heterogenes Klassifizierungsergebnis. Die Wahl der Input-Kanäle führt ebenfalls zu einer Veränderung des Ergebnisses, da einige Aufnahmekanäle mehr, und andere weniger differenzierende spektrale Information enthalten (vgl. Kap.: 8.1.1). Hier besteht das Problem, daß das Klassifizierungsergebnis in vielfältiger Art und Weise durch die Wahl der Parameter manipuliert werden kann. Durch die Wahl einer hohen Anzahl an Ergebnisklassen kann ein sehr heterogenes Klassifizierungsergebnis erreicht werden, das in diesem Ausmaß aber nicht mit der Realität der Bodeneigenschaften in Zusammenhang stehen muß. Die Frage nach dem aussagefähigsten und besten Ergebnis für den Untersuchungsrahmen ist nicht eindeutig zu klären, da die inhaltliche Aussage einer differenzierteren Klasseneinteilung innerhalb der vorliegenden Arbeit nicht mit Bodendaten belegt werden kann.

Die Klassifikationen mit einer hohen Anzahl (15) an Ergebnisklassen zeigen für jeden Schlag ein sehr heterogenes Bild der Klassenverteilung, wobei ein Großteil der Klassen nur wenige Pixel umfaßt. Diese aufgrund der geringen Größe vernachlässigbaren Klassen und der Umstand, daß diese Heterogenitäten nicht anhand der vorhandenen *Ground truth* (Kap.: 3.2) interpretiert werden können, führt zu der Wahl einer geringeren Klassenanzahl. Die durchaus vorhandenen kleinräumigeren Heterogenitäten im spektralen Reflexionsverhalten müßten im Rahmen eines fortführenden Projektes mit weiteren Bodendaten genauer untersucht, überprüft und interpretiert werden. Nur so kann geklärt werden, ob in ihnen überhaupt pflanzenbaurelevante Information enthalten ist, die für die landwirtschaftliche Praxis von Interesse ist. Ein Beispiel ist in der Abb. D-8 in Anhang D zu sehen.

Die für die Untersuchung gewählte Klassenzahl orientiert sich an der visuell erkennbaren und interpretierbaren Klassenanzahl von vier Ergebnisklassen. Diese Anzahl erschien aufgrund der visuellen Interpretation und der verfügbaren Bodendaten für geeignet. Die Anzahl der Input-Kanäle wurde reduziert und richtete sich für jeden Schlag nach dem in Kapitel 8.1

analysierten Informationsgehalt der jeweiligen Kanäle. Die Verwendung aller Input-Kanäle hatte in der Regel ein sehr heterogenes Klassifizierungsergebnis zur Folge (vgl. *Kap.: 7.5*), in welchem keine größeren Gebiete zusammenhängend eingeteilt wurden, und in dem die Interpretation anhand der Kartenwerke nicht mehr möglich war. Durch die geringe Anzahl von Klassen erfolgt in der Klassifikation nur eine großräumige Abgrenzung und Ausweisung heterogener Teilgebiete eines Schläges, die jedoch den genauen, kleinräumigen Ansprüchen, die das Teilschlagmanagement fordert, nicht gerecht werden kann.

Die richtige Wahl der Inputkanäle ist für die unüberwachte Klassifikation zur Ermittlung von Beprobungsflächen von großer Bedeutung. Wie der exemplarische Vergleich der Abbildungen von Schlag 414 zeigt (*Anhang E Abb. E-10-11*), kann die falsche Wahl zu beträchtlichem Informationsverlust führen. Das Ergebnis dieser beiden Klassifikationen zeigt einen deutlichen Unterschied in der Ausweisung der Klassen. So wird die südliche Spitze, deren Reflexionsverhalten wahrscheinlich durch den höheren Sandanteil hervorgerufen wird (*Kap.: 8.1.1.4*), in der Klassifikation ohne den Input der spektralen Information des MIR-Bereichs nicht ausgewiesen (*Anhang E Abb. E-10*). Da einige Bodenparameter ausschließlich, bzw. andere besser, in bestimmten spektralen Bereichen zu lokalisieren sind, ist eine der Klassifikation vorangestellte Analyse des aufnahmekanalspezifischen Reflexionsverhaltens der einzelnen Flächen notwendig. Diese Analyse ist für die betrachteten Schläge in Kapitel 8.1.1 erarbeitet worden.

Die Bedeutung der Kanalwahl wird ebenfalls deutlich, wenn die Klassifikationen der beiden verschiedenen Aufnahmesysteme betrachtet werden. Aufgrund der fehlenden Information des mittleren Infrarotkanals bei dem IRS-Aufnahmesystem werden die einzig über diesen Spektralbereich zu lokalisierenden Feldheterogenitäten in den Klassifikationen mit den IRS-Daten nicht dargestellt. Dies zeigen insbesondere die Abbildungen der Schläge 414 (*Anhang E Abb. E-12*), 704 (*Anhang F Abb. F-8*) und 809 (*Anhang H Abb. H-7*).

Das Klassifizierungsergebnis der einzelnen Schläge orientiert sich im großen und ganzen an der Gebietsabgrenzung mittels visueller Analyse der Reflexionswerte (*Kap.: 8.1*). Mit der unüberwachten Klassifikation erscheint es zumindest in kleinräumigen Gebieten möglich, im Reflexionsverhalten differierende Flächen voneinander abzugrenzen, die anhand der in der RBS enthaltenen Informationen über reflexionsrelevante Bodenparameter teilweise interpretiert werden können. Das Ergebnis zeigt sowohl die in Kapitel 8.1 aufgeführten

interpretierbaren Zusammenhänge, als auch die dort erwähnten zusätzlichen flächenhaften Heterogenitäten. Die durch die unüberwachte Klassifikation ausgewiesenen Klassen liefern keine neuen Anhaltspunkte, die durch die Informationen der RBS interpretierbar waren. Diese Flächen stellen vielmehr potentielle, homogene Beprobungsstandorte dar, auf denen stichprobenartige Untersuchungen durchgeführt werden können, um weitere standörtliche Bodeninformationen über reflexionswirksame Parameter zu erhalten, die in der RBS nicht hinreichend gegeben sind.

Auf eine Interpretation der Zusammenhänge zwischen Klasseneinteilung und der Bodenkarte wird an dieser Stelle verzichtet und auf *Kapitel 8.1* verwiesen. Die in dem Kapitel zuvor ermittelten Korrelationen und lokalisierten reflexionswirksamen Bodenparameter sind auch auf die Klassen der *Fuzzy-Klassifikation* anzuwenden. Die Klassifikationsergebnisse der einzelnen Testschläge sind den jeweiligen Abbildungen im Anhang zu jedem Schlag zu entnehmen. Wichtig für die Betrachtung der einzelnen Klassifizierungsergebnisse im Anhang ist es zu wissen, daß keine Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Schlägen und deren Klassenfarben bestehen.

8.1.3 Automatische Klassifikation des gesamten Untersuchungsraums

Die computergestützte Klassifikation des gesamten Untersuchungsraums soll zeigen, ob es möglich ist, ein großes Untersuchungsgebiet hinsichtlich verschiedener Feldheterogenitäten zu klassifizieren. Zum einen ist von Interesse, ob zwischen den Verbreitungsgebieten der hauptsächlich im Gebiet vorherrschenden lößbeeinflußten Böden und den Verwitterungsböden differenziert werden kann. Zum anderen soll die Lokalisierung der in der visuellen Interpretation erkannten Heterogenitäten untersucht werden. Aufgrund der vielfältigen, das Reflexionssignal modifizierenden Einflüsse (*Kap.: 5.4*), die in einem großen Untersuchungsgebiet zu zahlreichen verschiedenen Variationen der Objektreflexion führen können, ist nicht unbedingt mit einem positiven Ergebnis im Hinblick auf die Zielsetzungen zu rechnen.

Für die Untersuchung wurde ein hybrider Klassifikationsansatz (*Kap.: 7.5.1*) gewählt, der aus der Kombination eines unüberwachten und eines überwachten Klassifikators besteht. Die unüberwachte Klassifikationsmethode (*Kap.: 7.5.1*) dient dabei der Gewinnung von

Trainingsklassen, die in die nachgeschaltete, überwachte Klassifikation (*Kap.: 7.5.2*) integriert werden.

Der eigentlichen Klassifizierung gehen zwei wesentliche Arbeitsschritte voraus: Es müssen die Objektklassen aufgrund der Zielsetzung definiert und Trainingsgebiete für diese Objektklassen festgelegt werden. HILDEBRANDT (1996) weist dieser Vorbereitung der Klassifikation entscheidende Bedeutung zu, da durch die teilweise subjektiven Entscheidungen das Klassifikationsergebnis stark beeinflußt werden kann. Durch die Verwendung des unüberwachten Klassifikators zur Erstellung der Trainingsklassen erhält die Klassifikation eine erhöhte Objektivität.

8.1.3.1 Ermittlung der Trainingsgebiete

Die richtige Wahl der Trainingsgebiete ist von großer Bedeutung für das Klassifikationsergebnis. Zum einen muß das Trainingsgebiet für die jeweilige Objektklasse repräsentativ sein, d. h. daß möglichst die gesamte Grauwertvarianz der verschiedenen Erscheinungsformen dieser Klasse enthalten sein soll. Zum anderen darf der Grauwertbereich nicht zu weit gefaßt werden, um die Signaturüberschneidungen spektral ähnlich reflektierender Objekte, die sowieso ein Problem der Klassifizierung darstellen, nicht zu erhöhen.

Neben dem Kriterium der Repräsentativität ist auch die „Reinheit“ der enthaltenen Pixel von Bedeutung. Klassenfremde Bildelemente können die Grauwertstatistik der Musterklasse verfälschen und somit das Klassifizierungsergebnis beeinträchtigen. Die Wahl der Trainingsgebiete soll deshalb so ausgerichtet sein, daß keine Mischpixel enthalten sind. Randbereiche einer Objektklasse sind demnach als Trainingsgebiet ungeeignet und sollten vorher eliminiert werden. Besonders bei räumlich gering auflösenden Sensoren, wie es der Landsat-TM ist, ist die Abgrenzung reiner Trainingsgebiete sehr schwierig. Bei einer Auflösung von 30 m wird die spektrale Information eines Pixels immerhin von einer Fläche von 900 m² gebildet, und Mischpixel (*Kap.: 6.3*) sind kaum auszuschließen. Für die Abgrenzung der reinen Trainingsgebiete ist zudem eine weitreichende *Ground truth* notwendig, welche Informationen über die Flächennutzung, bzw. -eigenschaft enthalten muß. Als Richtgrößen für die Mindestanzahl an Pixeln eines Trainingsgebietes kann für homogene Klassen 50 und für heterogene 100 Pixel angenommen werden (HILDEBRANDT 1996).

Nach HILDEBRANDT (1992) ist des weiteren darauf zu achten, daß die gewählten Trainingsgebiete alle aus derselben Szene entnommen werden, da die unterschiedliche atmosphärische Streuung, sowie die unterschiedlichen Beleuchtungswinkel und -intensitäten verschiedener Aufnahmezeitpunkte, die spektrale Signatur der Objekte ebenfalls verfälschen können (*Kap.: 5.4*). Diese Modifikation der Reflexionseigenschaft wäre nur mit Hilfe komplizierter Beleuchtungsmodelle (vgl. *Kap.: 7.3.3*) zu korrigieren.

Die Aufgabenstellung der Arbeit erfordert die Abgrenzung von Trainingsgebieten für unterschiedliche Bereiche von Bodeneigenschaften oder Bodentypen, was unter der Maßgabe der Reinheit nicht zu bewältigen ist. Um dennoch eine überwachte Klassifikation durchführen zu können, werden die Trainingsgebiete mit Hilfe einer unüberwachten Klassifikation erarbeitet. Diese Verfahrensweise wurde z. B. von BRIXY (1997) zur Klassifikation von Bodenerosionsschäden im Mitteldeutschen Trockengebiet erfolgreich angewendet. Ein Vorteil dieser Bestimmungsmethode der Trainingsgebiete ist die Gewißheit, daß die verschiedenen Trainingsklassen eindeutig spektral trennbar sind, und daß auf eine Signaturanalyse der Musterklassen, die sonst als ein Vorbereitungsschritt durchgeführt werden müßte, verzichtet werden kann.

Als Grundlage für die Auswahl der Testgebiete, für welche die unüberwachte Klassifikation durchgeführt wurde, dienen verschiedene Informationsquellen:

- Ergebnisse der visuellen Interpretation (*Kap.: 8.1.1*)
- Orginalszenen des Landsat-TM und des IRS-1C
- Farbkompositen mit OIF erstellt (*Kap.: 7.4.2*)
- Vegetationsindex des Untersuchungsraums (Anhang L *Abb.: 1.1*)
- Reichsbodenschätzung
- landwirtschaftliche Standortkartierung (MMK)
- geologische Karte (*Kap.: 3.2.1*)
- topografische Karte (*Kap.: 3.2.2*)

Als Testgebiete für die unüberwachte Klassifikation wurden die Schläge 203 und 809 herangezogen. Sie liegen in unterschiedlichen Verbreitungsgebieten der Standortregionaltypen

(MMK), die sich in ihrem geologischen Ausgangsmaterial unterscheiden, und die signifikante räumliche Heterogenitäten in der Reflexion, als auch in der Klassifikation der RBS, aufweisen (Kap.: 4.4.2). Die räumlichen Feldheterogenitäten sind im Rahmen der visuellen Interpretation (Kap.: 8.1.1) erläutert.

Die Ermittlung der Trainingsklassen wurde mit dem *Fuzzy-Klassifikator* aus dem Softwareprogramm PCI (Kap.: 7.5.1.3) und den sechsdimensionalen Landsat-TM-Daten vom 22.09.97, bzw. den dreidimensionalen IRS-1C-Daten vom 25.09.97, durchgeführt. Dafür wurden die beiden Schlagflächen je Kanal „ausgeschnitten“ und je Aufnahmesystem in einem Datensatz vereint. Es wurden nichtlinearisierte, atmosphärenkorrigierte Daten (Kap.: 7.3.2) verwendet.

Für die Analyse der Differenzierungsmöglichkeit der beiden Bodenbereiche mit unterschiedlichem geologischen Ausgangsmaterial (Löß/Verwitterung) bot sich eine *Fuzzy-Klassifikation* mit zwei Klassen an, wobei jeder Schlag eine Klasse darstellen sollte. Hierbei zeigen sich die beiden Schläge in ihrem Spektralverhalten weitgehend trennbar, so daß sie als zwei Trainingsklassen verwertet werden konnten. Lediglich in Schlag 809 tritt ein kleiner Bereich auf, dessen Klasse in den Bereich von Schlag 203 fällt. Diese Klassenzuweisung läßt sich anhand der RBS-Informationen nicht nachvollziehen, sondern ist nur über Bodenproben interpretierbar. Die Überschneidung der Klassifizierung zwischen Verwitterungs- und Lößboden zeigt die Schwierigkeit der spektralen Trennung. Sie führt im überwachten Klassifizierungsergebnis in jedem Fall zu Fehlklassifikationen aus Sicht der Zielstellung, wenn man die RBS-Information als Grundlage betrachtet.

Bei einer möglichen Differenzierung der beiden Bodenbereiche mittels der überwachten Klassifikation des gesamten Untersuchungsgebietes sollten die Trainingsklassen noch etwas detaillierter differenziert werden. Um zu analysieren, ob die visuell interpretierbaren, schlaginternen Heterogenitäten (Kap.: 8.1.1) durch die automatische Klassifikation ebenfalls lokalisiert werden können, wurde eine zusätzliche Trainingsgebietmaske erstellt, die aus den verschiedenen, in der visuellen Interpretation lokalisierten Bereichen besteht. Nach mehreren unüberwachten Klassifikationsdurchläufen wurde das Ergebnis mit sechs Ergebnisklassen für am besten befunden (Anhang I Abb. I-1-2). Bei dieser Anzahl von Klassen wurden die beiden Schläge (203 und 809) in jeweils drei Cluster gleicher Merkmalsvektoren eingeteilt, die als spektral trennbare Trainingsgebiete zur Verfügung standen. Lediglich in Schlag 809 befindet

sich ebenfalls das kleine Gebiet (s. o.), daß einer Klasse aus Schlag 203 angehört. Die Klasseneinteilung entspricht weitgehend der visuellen Interpretation und der unüberwachten Klassifikation der beiden Testschläge (*Kap.*: 8.1.1 und 8.1.2). Das Ergebnis zeigte sich sowohl bei der Verwendung aller Kanäle als Input, als auch bei der Kanalwahl TM 347 und TM 345. Andere Kanalkombinationen lieferten dagegen teilweise abweichende Klasseneinteilungen.

Die *Fuzzy-Klassifikation* der beiden Testschläge mit sechs Ergebnisklassen ermöglicht eine recht eindeutige Differenzierung der beiden Bodenbereiche Löß- und Verwitterungsboden, wie es auch schon für zwei Trainingsklassen gezeigt wurde (s. o.). Die sechs Trainingsklassen aus Schlag 203 und Schlag 809 repräsentieren des weiteren noch verschiedene heterogene Gebiete und deren (teilweise interpretierbaren) Eigenschaften:

- insgesamt das spektrale Verhalten der Lößböden (blau)
- carbonatreichen Oberboden und geringe Bodenwerte (hellblau)
- unbekannte Eigenschaften (mittelblau und dunkelblau)
- insgesamt den Verwitterungsboden (rot/gelb/orange)
- tonhaltigen Oberboden (orange)
- unbekannte Eigenschaften (rot und gelb)

Die *Fuzzy-Klassifikation* der IRS-1C-Daten zeigte ein anderes Ergebnis: In diesem Fall waren die beiden Schläge nicht eindeutig durch ihre spektralen Eigenschaften voneinander zu trennen. Alle sechs zu erstellenden Klassen lagen in beiden Schlägen vor. Diese mangelnde Trennbarkeit kann nur in der fehlenden Information der MIR-Aufnahmekanäle begründet liegen, die demnach sehr wichtig für Differenzierungen hinsichtlich verschiedener Bodenparameter ist (vgl. *Kap.* 8.1.1). Die Vermutung wurde an einer *Fuzzy-Klassifikation* mit den entsprechenden Landsat-TM Kanälen 2, 3 und 4 überprüft und bestätigt. Das Ergebnis stimmte nahezu mit dem der IRS-Daten überein.

Aus den beiden verwendeten Schlägen lassen sich mit den IRS-Daten keine verwertbaren Trainingsklassen ermitteln. Die nachfolgende, überwachte Klassifikation wurde aus diesem Grund nur mit dem Datensatz des Landsat-TM durchgeführt.

8.1.3.2 Überwachte Klassifikation des Untersuchungsgebietes

Die überwachte Klassifikation wurde mit den zuvor in *Kapitel 8.1.3.1* ermittelten Trainingsgebieten durchgeführt. Als zu klassifizierende Daten wurden die mit dem Vegetationsindex maskierten Subimages aus der Landsat-TM Gesamtszene vom 22.09.97 verwendet. In den Kanälen des VIS wurde der Einfluß der Atmosphäre (*Kap.: 5.4.1*) durch eine einfache Atmosphärenkorrektur (*Kap.: 7.3.2*) minimiert. Auf die Linearisierung der Daten wurde verzichtet, da sie die Grauwerte verändert und die spektrale Information der Bodenoberfläche verfälscht.

In dem Softwareprogramm PCI standen drei verschiedene überwachte Klassifikatoren zur Verfügung. Die Funktionsweise jedes einzelnen ist in *Kapitel 7.5.2* näher erläutert und trägt zum Verständnis der gewählten Methode bei. Die Klassifikationsergebnisse wurden in dem Geografischen Informationssystem Arc View[®] der Firma ESRI mit der MMK des Untersuchungsgebietes verschnitten und analysiert.

Die verschiedenen Klassifikatoren liefern teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse. Die Klassifikationsergebnisse variieren zwischen den verschiedenen Klassifikatoren und auch innerhalb eines Klassifikators, wenn die Anzahl der Inputkanäle verändert oder z. B. eine Zurückweisungsklasse gefordert wurde. Die Zurückweisungsklasse bei der *Maximum-Likelihood-Klassifikation* (*Kap.: 7.5.2.3*) wurde bei den Versuchen nicht variiert, sondern die von dem Programm PCI vorgegebene verwendet. Die Unterschiede der verschiedenen Klassifikationen liegen in der Anzahl der klassifizierten, bzw. der Zurückweisungsklasse zugewiesenen Pixel und in der Höhe der Fehlklassifikationen bezogen auf die Zielstellung der Differenzierung beider Bodenbereiche. Die Deutung der Fehlklassifikationen beruht lediglich auf der visuellen Betrachtung der Ergebnisse und ist daher eine subjektive Einschätzung des Betrachters. Des weiteren können geografische und maßstabsbedingte Ungenauigkeiten der MMK, bzw. der Satellitendaten, zu falschen Annahmen führen, die jedoch akzeptiert werden müssen.

Im Hinblick auf die Zielstellung der Klassifikation liefert der *Maximum-Likelihood-Klassifikator* mit den Inputkanälen TM 347 das aussagefähigste Ergebnis. Die Verwendung von zwei Trainingsgebieten zeigt zwar eine große Zurückweisungsklasse, doch sind bei dem Vergleich mit der MMK durchaus eindeutige Korrelationen zwischen der Klassenverteilung

und den Bodenverbreitungsgebieten (MMK) zu erkennen (*Anhang I Abb. I-3*). Der Großteil der blauen Klasse, die dem Lößbereich zugewiesen ist, wird in der überwachten Klassifikation dem Lößverbreitungsgebiet zugeordnet, und die orangene Klasse des Verwitterungsbodens tritt ebenfalls größtenteils in den entsprechenden Verbreitungsgebieten auf. Es existieren auch Fehlklassifikationen, die auf ähnlichen spektralen Eigenschaften der beiden Bodenbereiche in den entsprechenden Gebieten beruhen können. Sie können aber auch durch äußere Einflüssen, die das spektrale Signal modifizieren (*Kap.: 5.4*), hervorgerufen werden.

Die hohe Anzahl der nicht klassifizierten Pixel beruht auf dem statistischen Ansatz des Klassifikators, der eine sehr genaue Übereinstimmung der Merkmalsvektoren eines Pixels für die Klassenzuteilung voraussetzt (*Kap.: 7.5.2.3*). Die große Zurückweisungsklasse entsteht wahrscheinlich durch die modifizierenden äußeren Einflüsse. Es kann aber durchaus auch sein, daß diese Pixel von Natur aus Merkmalsvektoren aufweisen, die durch die verwendeten Trainingsklassen nicht abgedeckt werden. Dies wäre durch zusätzliche Trainingsgebiete zu überprüfen, was im Rahmen der Arbeit jedoch nicht durchgeführt wurde. Die zusätzliche Erstellung von Trainingsklassen ist außerdem nur geeignet, wenn die neuen Klassen auch tatsächlich andere Bodeneigenschaften repräsentieren.

Aufgrund des recht positiven Ergebnisses der Klassifikation mit zwei Trainingsklassen wurde die gleiche Klassifikation noch einmal mit der differenzierteren Trainingsklassenvorgabe durchgeführt (*Anhang I Abb. I-4*). Die drei Trainingsklassen der blauen Färbung repräsentieren dabei das Reflexionsverhalten des Lößbereichs und die drei Klassen anderer Farbgebung den Bereich der Verwitterungsböden (s. o.).

Bei dieser *Maximum-Likelihood-Klassifikation* stimmt die räumliche Verteilung der zwei Klassenbereiche mit der Verteilung in der zuvor durchgeführten Klassifikation nahezu überein. Einige Veränderungen, insbesondere in der Verringerung der Zurückweisungsklasse, sind minimal und auf die größere Anzahl der Trainingsklassen, und damit auf die möglichen Merkmalsvektorkombinationen, zurückzuführen.

Mit dieser Klassifizierung sollte überprüft werden, ob auch eine differenzierte Klassifikation der in den Trainingsgebieten enthaltenen Heterogenitäten über den ganzen Untersuchungsraum möglich ist. Aus der vergleichenden, analytischen Betrachtung des Klassifikationsergebnisses mit der MMK lassen sich diese kleinräumigen Informationen nicht

entnehmen, so daß die Analyse mit den vektorisierten RBS-Daten der Testschläge erfolgen mußte. Diese Verifikation wird in dem nächsten *Kapitel 8.1.3.3* erläutert.

Im Anhang ist eine Abbildung einer Klassifikation mit dem *Parallelepiped-Klassifikator* enthalten (*Anhang I Abb. I-5*). Sie zeigt bei gleichen Inputkanälen (TM 347) ein etwas anderes Klassifikationsergebnis: Die Zurückweisungsklasse ist kleiner als bei der *Maximum-Likelihood-Klassifikation*. Dies ist auf die weiter gefaßte Definition des Merkmalraums, die der Klassifikation zugrunde liegt, zurückzuführen (*Kap.: 7.5.2.2*). Aufgrund des vermehrten Auftretens von Fehlklassifikationen bei dem visuellen Vergleich mit der MMK, die im Sinne der Zielstellung eine größere Ungenauigkeit darstellen, wird die Verifikation des Ergebnisses der einzelnen Testschläge lediglich mit der *Maximum-Likelihood-Klassifikation* durchgeführt.

8.1.3.3 Verifizierung der Klassifikation

Die Verifikation bezieht sich hauptsächlich auf die Klassifizierung der beiden Bereiche unterschiedlicher geologischer Ausgangsmaterialien (Löß-/Verwitterungsboden) der Bodenentwicklung und zweitrangig auf die kleinräumigen Heterogenitäten, die der Trainingsklasseneinteilung zugrunde liegen. Die Untersuchung der Klassifikation der Feldheterogenitäten wird mit Hilfe der zuvor schon bearbeiteten Testschläge (*Kap.: 4.4.2*) durchgeführt. Die Klassifizierungsergebnisse der Schläge wurden dafür wiederum mit den RBS-Vektoren überlagert, und die Klasseneinteilung mit der Karteninformation verglichen.

Die Verteilung der Lößböden stimmt, wie in *Kapitel 8.1.3.2* schon erläutert, größtenteils mit den blauen Klassen überein (*Anhang I Abb. I-6, I-7 und I-9*). Der westliche Teil des Schlages 706 (*Anhang I Abb. I-10*), der ebenfalls in einem Lößbereich liegt, zeigt dagegen ausschließlich eine Zuordnung zu den Verwitterungsklassen. An diesem Schlag wurde in der visuellen Interpretation (*Kap.: 8.1.1.6*) schon gezeigt, daß der Bearbeitungsstand der Bodenoberfläche höchstwahrscheinlich einen verfälschenden Einfluß auf das Reflexionssignal ausübt. Auch für die Klassifikation ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, daß die Bodenbearbeitung die Ursache für die veränderte spektrale Eigenschaft gegenüber den anderen Lößflächen ist. In dem sich östlich anschließenden Teilschlag, der aller Wahrscheinlichkeit nach einen anderen Bearbeitungsstand aufweisen muß (*Kap.: 8.1.1.6*), sind in der Klassifikation dagegen der blauen Klasse zugewiesene Pixel enthalten. Die klassifizierten Pixel des Schlages 414, der von Verwitterungsböden dominiert wird, sind auch

hauptsächlich einer spektralen Klasse der Verwitterungsböden zugeordnet. Der südliche Lößbereich von Schlag 414 enthält dagegen klassifizierte Pixel der entsprechenden Klasse der Lößböden (*Anhang I Abb. I-8*). Die Verwitterungsbodenareale von Schlag 704 zeigen ebenfalls eine korrekte Zuordnung zu den entsprechenden gelb/orangen Trainingsklassen (*Anhang I Abb. I-9*), wobei auch einige Lößbereiche mit in diese Klassen hineinfallen.

Diese Analyseergebnisse bestätigen eindeutig die Aussage, die in Kapitel 8.1.3.2 getroffen wurden. Die überwachte Klassifikation eines großen Untersuchungsraums kann trotz vielfältiger äußerer Einflüsse eine gute Abgrenzung von Löß- zu Verwitterungsböden aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften an der Oberfläche leisten. Da das spektrale Reflexionsverhalten einer Bodenoberfläche aus den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Oberbodens resultiert, die wiederum weitgehend von dem geologischen Ausgangsmaterial bestimmt werden, bezieht sich die Flächenabgrenzung auf gleiche reflexionswirksame Bodeneigenschaften/-parameter. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Bodendecke stellen sich nach den Untersuchungsergebnissen im betrachteten Untersuchungsgebiet als charakteristisch für die Oberböden über unterschiedlichen Ausgangsmaterialien dar. Es ist jedoch in der Regel nicht davon auszugehen, daß eine Differenzierung nach einzelnen Bodentypen der Bodensystematik möglich ist (vgl. *Kap.: 6.4*).

Die Betrachtung der kleinräumigen Heterogenitäten zeigt dagegen geringere Korrelationen zwischen der zugewiesenen Klasse und den interpretierbaren Eigenschaften, bzw. den in der Bodenkarte eingetragenen Informationen, die den Trainingsklassen zugrunde liegen. Es erweist sich als ungenügend und nicht praktikabel die in einem Teilbereich ermittelten Spektralcharakteristika einzelner Heterogenitäten als Grundlage für die computergestützte Klassifizierung von weiter entfernt liegenden Gebieten einzusetzen. Die detaillierteren Informationen kommen in diesem Fall nicht mehr zur Geltung. Der Grund dafür ist in den variierenden Belichtungs- und Aufnahmewinkeln, dem Relief und den Unterschieden in der Oberflächenstruktur zu sehen, durch die das Reflexionssignal von Teilraum zu Teilraum unterschiedlich beeinflusst wird (*Kap.: 5.4*). Unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalte können, wie des öfteren schon erwähnt, wahrscheinlich im Rahmen dieser Untersuchung außer acht gelassen werden, haben aber ansonsten ebenfalls einen starken reflexionsmindernden und verfälschenden Einfluß auf die Objektsignatur (*Kap.: 6.1.2.1*).

Die Klassenzuteilung der Pixel innerhalb der einzelnen Testschlaggrenzen wird im Folgenden dargestellt:

- Auf dem Schlag 205, der in unmittelbarer Nähe zu Schlag 203 (Trainingsgebiet) liegt, sind die genannten modifizierenden äußeren Einflüsse minimal. Hier zeigt sich durchaus eine Korrelation zwischen der Klasseneinteilung durch den *Maximum-Likelihood-Klassifikator* und den zugrundeliegenden Kriterien (*Anhang I Abb. I-6*). Die in Schlag 205 hellblau klassifizierten Bereiche weisen in der RBS die gleiche Klasseneinteilung auf, wie die Musterklasse dieser Farbe (*Anhang I Abb. I-1*). Auch die anderen Farbklassen lassen durchaus einen Zusammenhang erkennen, wobei die zugrundeliegenden Kriterien anhand der RBS nicht interpretierbar sind (*Kap.: 8.1.1.2*).
- Die als Lößbereich klassifizierten Flächen in den Schlägen 304 (*Anhang I Abb. I-7*) und 704 (*Anhang I Abb. I-9*) sind der hellblauen Trainingsklasse aus Schlag 203 (*Anhang I Abb. I-1*) zugeteilt. Ihre spektralen Merkmalsvektoren liegen demnach den der Trainingsklasse zugrundeliegenden Merkmalsvektoren am nächsten. Der Vergleich mit den Aussagen der RBS zeigt jedoch keine Übereinstimmung mit der Trainingsklasse. Die reinen Lößgebiete von Schlag 304 und 704, die eigentlich der mittel-, bzw. dunkelblauen Trainingsklasse hätten zugeordnet werden müssen, zeigen ein spektrales Verhalten, das der durch das carbonathaltige Ausgangsgestein (*Kap.: 8.1.1.1*) beeinflussten Trainingsklasse entspricht. Es ist hier höchstwahrscheinlich von einer Modifikation des Reflexionssignals durch äußere Einflüsse auszugehen.
- Die Heterogenität in Schlag 304 (*Anhang I Abb. I-7*), die in der visuellen Interpretation als carbonathaltiges Ausgangsgestein (Verwitterungsboden) identifiziert wurde (*Kap.: 8.1.1.3*) und der hellblauen Klasse entsprechen würde, wird in der Klassifikation als Heterogenität erkannt, jedoch der Zurückweisungsklasse zugeteilt, da sich die Merkmalsvektoren keiner vorgegebenen Trainingsklasse zuordnen lassen. Das spektrale Signal muß demnach ein anderes sein, als das der hellblauen Trainingsklasse, der ebenfalls carbonathaltiges Ausgangsgestein als reflexionswirksamer Faktor zugrunde liegt. Dies könnte ebenfalls (s. o.) ein Hinweis auf ein durch äußere Einflüsse verändertes Reflexionssignal sein. Eine andere Möglichkeit ist, daß die in Kapitel 8.1.1.3 vorgenommene Interpretation nicht den realen Gegebenheiten entspricht, was aufgrund der ungenügenden Bodendaten durchaus in Betracht kommt.

- Der in Kapitel 8.1.1.3 erwähnte, nördliche, heterogene Bereich auf Schlag 304 (*Anhang D Abb. D-5*), der sich visuell eindeutig abgrenzen aber anhand der Datengrundlage nicht interpretieren läßt, wird in der Klassifikation der gelben Klasse der Verwitterungsbodenbereiche zugeteilt. Es kann im Rahmen dieser Arbeit aber nicht geklärt werden, ob in diesem Bereich tatsächlich verwittertes Ausgangsmaterial für die Reflexion verantwortlich ist, oder ob diese Klassifizierung durch die äußeren Einflüsse verursacht wird.
- Der in Schlag 704 vorliegende Bereich mit verwittertem geologischen Ausgangsmaterial (*Anhang F Abb. F-5*) wird, wie in *Kapitel 8.1.3.2* erwähnt, in die entsprechenden Trainingsklassen klassifiziert (rot, orange, gelb). Es ist interessant, daß der in der RBS als Fläche mit erhöhtem Tonanteil (LT) ausgewiesene Bereich der orange farbenen Klasse zugeordnet wird (*Anhang I Abb. I-9*), welcher genau dieses Kriterium zugrundeliegt (*Kap.: 8.1.3.1*). Die spektrale Eigenschaft des Tons auf Schlag 704 ist demnach höchstwahrscheinlich für diese Klassifizierung verantwortlich. Die das spektrale Signal modifizierenden äußeren Einflüsse haben, wenn sie aufgrund der geringen Entfernung von der Trainingsklasse überhaupt existieren, nur eine geringe Auswirkung. Zu der Übereinstimmung der Kriterien der anderen beiden Klassen läßt sich aufgrund der fehlenden Datengrundlagen über die vorherrschenden Bodenverhältnisse keine Aussage machen (*Kap.: 8.1.1.5*).
- Auf dem lößdominierten Schlag 706 bestehen nahezu keine Korrelationen (*Anhang I Abb. I-10*) zwischen den zugrundeliegenden Kriterien der Farbklassen und den Informationen der RBS. Der gesamte östliche Teilschlag (der in *Anhang G Abb. G-5* mit der RBS überlagerte Teilbereich) wird in die Klassen der Verwitterungsböden klassifiziert, obwohl größtenteils Lößstandorte anzutreffen sind. Diese Fehlklassifizierungen werden wahrscheinlich durch die anthropogene Bearbeitung des Bodens verursacht (*Kap.: 8.1.1.6*). Es ist fraglich, ob die auf dem Schlag vorhandenen Verwitterungsbodenbereiche aufgrund ihrer spektralen Eigenschaft den Verwitterungsklassen zugeordnet wurden, oder aber diese Zuordnung nur durch den modifizierenden Einfluß der Bodenbearbeitung erfolgte. Letzteres ist jedoch in diesem Fall wahrscheinlicher.

- Im Gegensatz zu den anderen Testschlägen liegt der Schlag 414 weiter von den Trainingsklassen entfernt. Obwohl er sich vorwiegend in einem Verwitterungsbodenbereich befindet, wird nur eine geringe Anzahl von Pixeln klassifiziert (*Anhang I Abb. I-8*). Der Großteil der klassifizierten Flächen ist dabei der tondominierten orangefarbenen Trainingsklasse zugeordnet. Diese Klasseneinteilung läßt sich anhand der RBS nicht nachvollziehen, da aus ihr keine Informationen über einen erhöhten Tongehalt in den Teilbereichen des Schlages zu entnehmen sind. Aufgrund der beiden genannten Fakten ist auch in diesem Fall davon auszugehen, daß das Reflexionssignal durch andere Einflüsse verändert wurde. Insbesondere der Exposition kann hier höchstwahrscheinlich der entscheidende Einfluß zugeschrieben werden (*Kap.: 4.4.2.5*), da sie eine andere Richtung aufweist als die Exposition des Trainingsgebietes.
- Die südliche, sanddominierte Spitze von Schlag 414, die zudem durch eine Lößdominanz gekennzeichnet ist, wird einer Lößklasse (blau) zugeordnet (*Anhang I Abb. I-8*). Die Kriterien der RBS, die diese dunkelblaue Trainingsklasse kennzeichnen, stehen jedoch in keinem Zusammenhang mit den auf Schlag 414 vorkommenden sandigen Lehmen, die für diesen Bereich als reflexionswirksam interpretiert wurden (*Kap.: 8.1.1.4*). Auch hier sind höchstwahrscheinlich die erwähnten Einflüsse der Exposition für die ähnlichen spektralen Merkmalsvektoren verantwortlich.

Durch die genaue Analyse der Klassifikation anhand einzelner Schläge, die in verschiedenen Teilbereichen des Untersuchungsgebietes liegen, wird deutlich, daß die Klasseneigenschaften der differenzierten Trainingsklassen mit zunehmender Entfernung der klassifizierten Fläche weniger mit den klassifizierten Bereichen übereinstimmen. Eine Erklärung für diese Diskrepanz kann der mit der Entfernung in der Regel zunehmende Einfluß äußerer Bedingungen sein. Es muß in diesem Zusammenhang aber noch einmal deutlich darauf hingewiesen werden, daß der Reflexionsanalyse nur die Kenntnis über einige wenige reflexionswirksame Bodenparameter zugrunde liegt. Die verschiedenen oder gleichen spektralen Merkmalsvektoren von Flächen, die durch die RBS gleich oder verschieden klassifiziert werden, können durchaus auch auf anderen Bodenparametern beruhen (*Kap.: 6.1*), über die aus dem Kartenwerk keine Informationen gewonnen werden können. Im Rahmen der visuellen Interpretation (*Kap.: 8.1*) wurde des öfteren versucht auf die möglichen

Parameter hinzuweisen, die für die Ausbildung des vorliegenden spektralen Signals in Frage kommen können.

Durch die Untersuchung wird aber auch deutlich, daß durchaus anhand der RBS interpretierbare Zusammenhänge durch die *Maximum-Likelihood-Klassifikation* wiedergegeben werden. Eine Differenzierung der geologischen Ausgangsmaterialien erscheint für den untersuchten Landschaftsteilraum auf diese Art und Weise jedenfalls möglich. Diese Ergebnisse können jedoch nur mit der Integration weiterer Bodeninformationen durch Felderhebungen genauer analysiert und interpretiert werden.

8.2 Analyse der Korrelation von Bodeneinhaltsstoffen und Reflexionswerten

In der Analyse der Korrelation zwischen den Reflexionswerten der verschiedenen Aufnahmekanäle und den Bodeneinhaltsstoffen, bzw. -eigenschaften, werden die in der Satellitenszene aufgezeichneten Grauwerte mit den in der Bodenuntersuchung (*Kap.:3.2.5*) erhobenen Ergebnissen verglichen. Das Ziel dieser Analyse ist es, mögliche, vorhandene Korrelationen zwischen dem räumlichen Verteilungsmuster der Grauwerte (Reflexionswerte) und der Verteilung der Bodeneinhaltsstoffe bzw. den Bodeneigenschaften aufzuzeigen.

Die Untersuchung der spektralen Erkennbarkeit von Bodeneinhaltsstoffen bzw. Bodeneigenschaften erfolgte an dem Schlag 211 (*Kap.: 4.4.2.3*). Für diesen Schlag liegen tiefgreifende Bodenuntersuchungsergebnisse vor (*Kap.: 3.2.5*). Als Fernerkundungsdaten wurde hauptsächlich der spektrale Datensatz der IRS-1C-Aufnahme vom 01.09.97 verwendet, da nur diese Aufnahme völlig unbedeckten Boden zum Aufnahmezeitpunkt aufwies. Des weiteren wurde auch die Landsat-TM-Szene vom 22.09.97 analysiert, obwohl der Schlag 211 durch den Vegetationsindex nicht als reines Bodensignal ausgewiesen wurde (Anhang L *Abb. 1*). Die vorhandenen Fotos (vom 16.09.97) zeigen für Teilflächen des Schlages eine sehr geringe, gerade ausgetriebenen Vegetationsdecke (Raps). Es ist daher fraglich, in wie weit diese Vegetationsbedeckung das spektrale Signal des Bodens beeinflusst, und die im Bild erkennbaren Heterogenitäten darauf zurückzuführen sind. Nach SHORT (1982) zeichnet sich erst ab einer Vegetationsbedeckung von 10 % die typische spektrale Charakteristik der Vegetation (*Kap.: 6.3*) in der Aufnahme der Fläche ab.

Ein Vergleich der Reflexionswerte in den Kanälen TM-3 und TM-4 im Bodensignaturdiagramm (*Abb.: 23*) der Landsat-TM Aufnahme zeigt einen leicht verstärkten Anstieg der Reflexion mit Zunahme der Wellenlänge. Diese Zunahme deutet auf eine gering vorhandene Reflexionswirksamkeit der Vegetation hin. Deutlich wird dies insbesondere durch den Vergleich mit den Signaturanalysen (Aufnahmedatum 22.09.97) der anderen Testschläge (*Kap.: 8.1.1*), die zum Aufnahmezeitpunkt vollständig vegetationslos waren (*Abb.: 16-22*). Hier zeigt sich, daß bei einem vegetationslosen Boden in der Regel ein linearer oder sogar abgeschwächter Anstieg der Reflexion von dem roten in den nahen infraroten Aufnahmebereich vorherrscht. Bei Schlag 211 ist der Anstieg jedoch stärker ausgeprägt (*Abb.: 23*).

Das Bodensignaturdiagramm in Abbildung 23 wurde für drei Teilbereiche eindeutig unterschiedlicher Reflexionsintensität erstellt. Die zugrundeliegende Abgrenzung der Gebiete wird in Kapitel 8.2.1 erläutert.

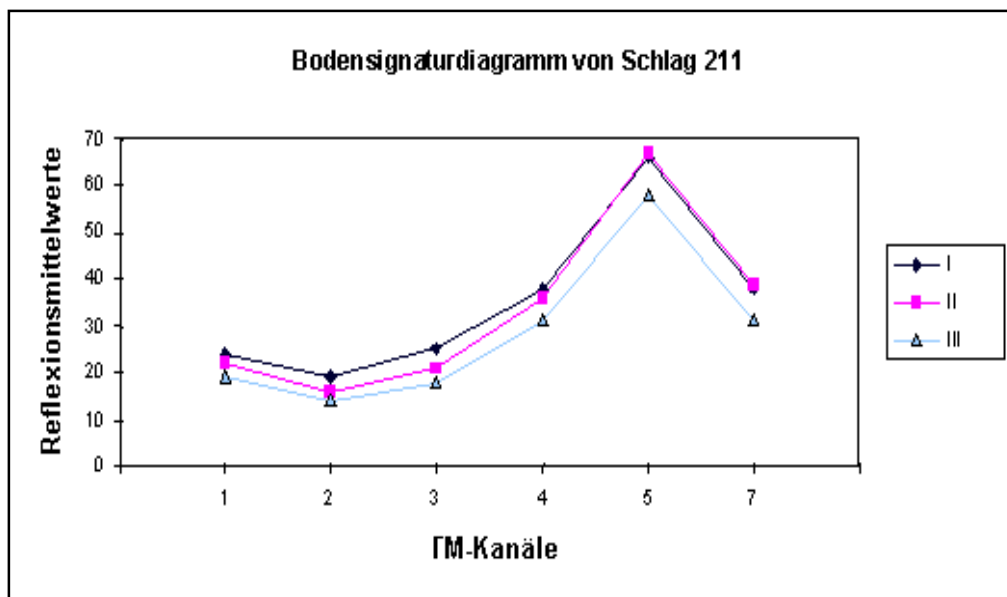


Abb. 23: Bodensignaturdiagramm von Schlag 211(Landsat-TM 22.09.97).

Bei der Untersuchung wurden die Rohdaten der verschiedenen Kanäle und das Ratio aus den IRS-1C Kanälen $^{2/3}$ (*Anhang J Abb. J-6*) verwendet. Die Ratiobildung (*Kap.: 7.4.1*) wurde durchgeführt, um zu gewährleisten, daß die spektrale Signatur der Fläche nur minimal durch äußere Einflüsse modifiziert ist. Die Einflüsse des Reliefs (VINCENT 1997) und der Bodenfeuchtigkeit (FRAZIER ET AL. 1989) können auf diese Weise minimiert werden (*Kap.: 6.1.2.1*).

8.2.1 Beschreibung der Grauwertverteilung

Die Grauwertverteilung wird aus den in *Kapitel 8.2* genannten Gründen anhand der IRS-Daten analysiert. Die IRS-1C Aufnahme des Schlages 211 läßt sich insbesondere in den spektralen Kanälen 1 und 2 (*Anhang J Abb. J-2a-b*), dem grünen und dem roten sichtbaren Spektrum, und in verschiedenen RGB-Darstellungen (*Anhang J Abb. J-5*) visuell in drei Bereiche differenter Grau-, bzw. Farbwerte untergliedern:

- **Bereich I** im Nordosten, der dem Hangbereich entspricht und sich in den beiden VIS-Kanälen besonders durch sehr helle Grautöne, d. h. stärkere Reflexion, abhebt und auch im NIR-Bereich hellere Werte aufweist als der Rest des Schlages
- **Bereich II**, der in den beiden VIS-Kanälen und in dem NIR-Kanal mit mittleren Grautönen gekennzeichnet ist
- **Bereich III** zeichnet sich in den VIS-Kanälen durch eine geringe Reflexion mit sehr dunklen Grautönen ab. Er erstreckt sich von Nordwesten her entlang der westlichen Seite des Schlages.

Der NIR Kanal des IRS-1C zeigt diese Unterteilung in der linearisierten Darstellung nur sehr schwach, was auf die zugrundeliegende Rechenoperation der Linearisierung in dem Programm JENATOP zurückzuführen ist (*Anhang J Abb. J-2c*).

Das Bodensignaturdiagramm in Abbildung 24 zeigt die deutlich unterschiedliche Reflexionsintensität der Teilbereiche in den drei spektralen Aufnahmekanälen des IRS-1C. Die Erstellung des Diagramms erfolgte analog der in *Kapitel 8.1.1* beschriebenen Vorgehensweise. Die Pixelkoordinaten, die für die Erstellung des Bodensignaturdiagramms in Abbildung 24 verwendet wurden, sind auch für das Bodensignaturdiagramm der Landsat-TM Daten (*Abb.: 23*) herangezogen worden.

Bei der Ratiobildung erweist sich die Kanalkombination $^{2/3}$ des IRS-1C als das Aussagekräftigste (*Anhang J Abb. J-6*). Im Gegensatz zu den anderen IRS-Ratios ist für diese arithmetische Datenverknüpfung eine Differenzierung des Schlages in zwei unterschiedliche Teilbereiche möglich. Das Ergebnis zeigt aber keine so kontrastreiche Grauwertheterogenität, wie sie in den linearisierten Einzelkanaldarstellungen der Kanälen 1 und 2 abgebildet wird.

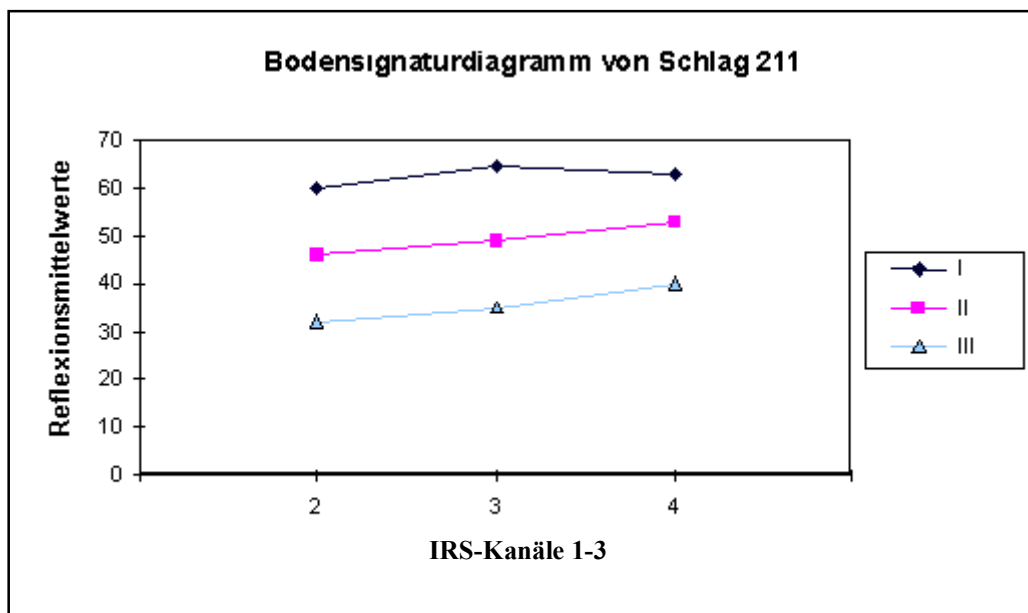


Abb. 24: Bodensignaturdiagramm von Schlag 211 (IRS-1C, 01.09.1997).

In den Landsat-TM Kanälen des VIS und des TM-5 ist diese dreigeteilte Differenzierung nur teilweise gut zu erkennen (*Anhang J Abb. J-1a-c*). Im Kanal TM-4 hebt sich ein auffällig hellerer Streifen ab, der von Süden nach Nordosten über den gesamten Schlag verläuft. Er wird möglicherweise durch die gering vorhandene Vegetation hervorgerufen. In den Ratios der Landsat-TM Kanäle $4/5$ und $3/4$ (*Anhang J Abb. J-7a-b2*) sind zwar Unterschiede in der Graufärbung zu erkennen, doch gleichen diese nicht der Gebietsabgrenzung durch die IRS-Grauwerte. Auch dies ist möglicherweise durch den Einfluß der Vegetation auf Kanal TM-4 bedingt. Die Landsat-TM Daten sind in ihrer Aussagefähigkeit über den Boden kritisch zu betrachten, da sie teilweise durch die Reflexionseigenschaften der Vegetation beeinflusst sein können. Aus diesem Grund bezieht sich die folgende Analyse im wesentlichen auf die IRS-1C Daten vom 01.09.97.

8.2.2 Beschreibung der Bodenuntersuchungsergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse des Untersuchungsprogramms sind in den in Anhang K zu sehen und lassen sich wie folgt darstellen:

Bei der Betrachtung der physikalischen Eigenschaften des Bodens läßt sich der nordöstliche Hangbereich (Bereich I) fast durchweg von dem restlichen Gebiet des Schlages abgrenzen. Dieser Bereich des Schlages zeigt deutlich höhere Sandgehalte und wahrscheinlich eine daraus resultierende, höhere effektive Lagerungsdichte mit geringerem Porenvolumen als der

Rest des Schlages (vgl. *Kap.*: 3.2.5). Die Sandgehalte erreichen bis über 20 mas-%. Auf der Hangkuppe des nach Nordosten exponierten Hanges ist die Lößdeckschicht vollständig erodiert (HOPF 1998, S. 40). Durch Pflugbearbeitung fand hier eine Durchmischung des Ap-Horizontes mit dem geologischen Ausgangsmaterial statt. Die erhöhten Sandgehalte im Oberboden lassen dabei auf Schichten des unteren Keupers als geologisches Ausgangsgestein schließen (*Kap.*: 4.2). Die erhöhten Sandgehalte im Hangbereich lassen sich nach HOPF 1998 (S. 40) jedoch nur schwer erklären. Dieser Bereich zählt noch nicht zur Akkumulationszone für das auf der Hangkuppe erodierte sandhaltige Material. Diese Sandgehalte resultieren vermutlich aus dem unter dem Ap-Horizont liegenden Solifluktlionslöß mit sandigem Fremdmaterial (*Kap.*: 4.2). Der im Oberboden dieses Bereichs liegende, reflexionswirksame Sand (vgl. *Kap.*: 6.1.1.4) kann für die erhöhte Reflexion dieses Bereiches verantwortlich sein.

Aus diesen Faktoren lassen sich auch die anderen, in dem Hangbereich festgestellten, physikalischen Bodeneigenschaften erklären. Das Areal zeichnet sich durch eine geringere Wasserspeicherkapazität und nutzbare Feldkapazität (nFk) aus und grenzt sich auch in diesen Eigenschaften von dem restlichen Schlag ab. In den anderen Bereichen des Schlages treten die aufgenommenen Meßwerte heterogen verteilt auf. Einzig der Tongehalt zeigt eine der Grauwertverteilung in etwa entsprechende Dreiteilung, die auf einen möglichen Zusammenhang hindeutet. Der Schluffgehalt des Oberbodens zeigt über die gesamte Schlagfläche eine homogene Verteilung und läßt sich nicht in differenzierte Teilgebiete untergliedern.

Der nordöstliche Bereich entspricht in seiner geografischen Lage und räumlichen Ausdehnung in etwa dem Bereich I (*Kap.*: 8.2.1). Die beiden anderen Bereiche II und III lassen sich nur für den Tongehalt ausmachen.

Die chemischen Bodeninhaltsstoffe, die aufgrund ihrer reflexionswirksamen Eigenschaften die Reflexion eines Bodens besonders stark beeinflussen, weisen in ihren Konzentrationen eine durchweg sehr heterogene Verteilungsstruktur auf. Der oben erwähnte Bereich I zeichnet sich auch bei den meisten Inhaltsstoffen als eindeutig abgrenzbares Gebiet ab. Besonders bei dem Stickstoff-, Magnesium, Calciumcarbonat-, Kalium- und Humusgehalt zeigt sich ein deutlicher Kontrast zu dem umliegenden Gebiet. Es läßt sich aber auch die in der Grauwertverteilung erkennbare Dreiteilung des Schlages für diese Inhaltsstoffe vornehmen. Der Gehalt der genannten Bodenparameter nimmt dabei von Bereich I bis Bereich III zu.

Lediglich der Calciumcarbonatgehalt hat eine entgegengesetzte Verteilungsstruktur mit den höchsten Gehaltsmengen in Bereich I. Das pflanzenverfügbare Phosphor zeigt eine heterogene Verteilung über den gesamten Schlag und läßt sich in keine Teilgebiete differenzieren.

Die Bodenuntersuchungen zeigen signifikante, positive Korrelationen zwischen den verschiedenen Bodeneinhaltsstoffen. So stehen z. B. der Humusgehalt und der Anteil an Tonmineralen in einem engen Zusammenhang (*Kap.: 3.2.5*). Auch der Stickstoff- und Phosphorgehalt im Bodenkörper korrelieren in der Regel stark mit dem Humusgehalt, wobei dieser Zusammenhang in der vorliegenden Untersuchung nur für den Stickstoffgehalt eindeutig zu identifizieren ist. Die anderen Pflanzennährstoffe zeigen im allgemeinen einen Zusammenhang mit dem Tongehalt. Dies gilt insbesondere für Magnesium, sowie für Kalium. Für das Kalium gilt hierbei eine Besonderheit: Steigender Tongehalt erhöht die K-Fixierung. Bei der Bodenuntersuchung wurden im südlichen Bereich die höchsten Werte an leicht austauschbarem Kalium festgestellt. Durch die hohen Tongehalte an dieser Stelle wäre demnach eigentlich von geringen Werten auszugehen, da das Kalium fixiert sein müßte. Zurückzuführen ist der hohe Kaliumgehalt auf die verbesserte Wasserspeicherfähigkeit und die dadurch besseren Transportbedingungen in Gebieten höherer Tongehalte. Es kann daher genügend austauschbares Kalium nachgeliefert werden (LIEBEROTH 1982).

8.2.3 Interpretation der Korrelationen

Die Interpretation der Grauwertverteilung bezieht sich größtenteils auf das in *Kapitel 6.1* erarbeitete Wissen über die bodenparameterspezifische Reflexionswirksamkeit. Der Schlag 211 zeichnet sich über die gesamte Fläche durch relativ hohe Humusgehalte aus. Sie liegen durchweg dicht unter, bzw. größtenteils über der 2 % Marke. Da ein Humusgehalt von > 2 % den Einfluß aller anderen, reflexionswirksamen Bodenparameter unterdrückt (*Kap.: 6.1.1.1*) (STONER und BAUMGARDNER 1981), ist davon auszugehen, daß die erkennbaren Strukturen der Grauwertverteilung auf der Verteilung des Humusgehalts beruhen, bzw. durch die Bodenfeuchtigkeit oder das Relief bedingt waren. Die klimatischen Verhältnisse in den Tagen vor dem Aufnahmezeitpunkt des IRS-1C (01.09.97) waren so, daß der Einfluß der Bodenfeuchtigkeit auf die spektrale Signatur der Bodenoberfläche nicht vollständig ausgeschlossen werden konnte (*Kap.: 3.1.1*).

Das Muster räumlicher Variabilität verschiedener, miteinander korrelierender Bodenparameter kann mit dem Raummuster der dreigeteilten Grauwertverteilung (*Kap.: 8.2.1*) in Einklang gebracht werden. Insbesondere die negative Korrelation des Humusgehaltes mit dem roten Spektralbereich und dem des nahen Infrarots (NIR), die von verschiedenen Wissenschaftlern, u. a. von FRAZIER ET AL. (1989) und LEONE ET AL. (1995), beschrieben wurde (vgl. *Kap.: 6.1.1.1*), wird durch dieses Ergebnis bestätigt, und auch für den Kanal des grünen, elektromagnetischen Spektrums der IRS-Daten gezeigt (*Abb.: 25*). Der Bereich, für den die geringsten Humusgehalte festgestellt wurden, war der nordöstliche Hangbereich (Bereich I), der sich gleichzeitig durch die höchsten Reflexionswerte in allen Kanälen auszeichnet, wie aus dem Bodensignaturdiagramm eindeutig zu entnehmen ist (*Abb.: 25*).

In diesem Gebiet liegen in der obersten Bodenschicht (bis 30 cm) Werte von 1,7-2,6 % vor. Die Bereiche mit den mittleren Reflexionswerten (Bereich II) zeigen eine relativ genaue Überdeckung mit den Arealen, auf denen Humusgehalte von 2,7-3,5 % gemessen wurden. Der Streifen mit den dunkelsten Grauwertstufen und der geringsten Reflexion (Bereich III) ist mit den Humusgehalten von 3,6-4,3 % in Verbindung zu bringen.

Durch diesen eindeutigen Zusammenhang wäre allerdings zu erwarten, daß insbesondere die große dunkle Fläche im Nordwesten des Schlages (*Abb.: 25*) in den Ergebnissen der Bodenuntersuchung mit hohen Humusgehalten belegt ist. Dies bestätigt sich aber nicht. Die Ursache kann möglicherweise in einer temporär bedingten Veränderung (z. B. Bodenbearbeitung) liegen, da die Satellitenaufnahme ein halbes Jahr nach den Bodenuntersuchungen aufgezeichnet wurde. Auch Feuchtigkeitsunterschiede können aufgrund der in Kapitel 3.1.1 dargestellten klimatischen Verhältnisse vor dem Aufnahmezeitpunkt am 01.09.1997 nicht vollständig ausgeschlossen werden.

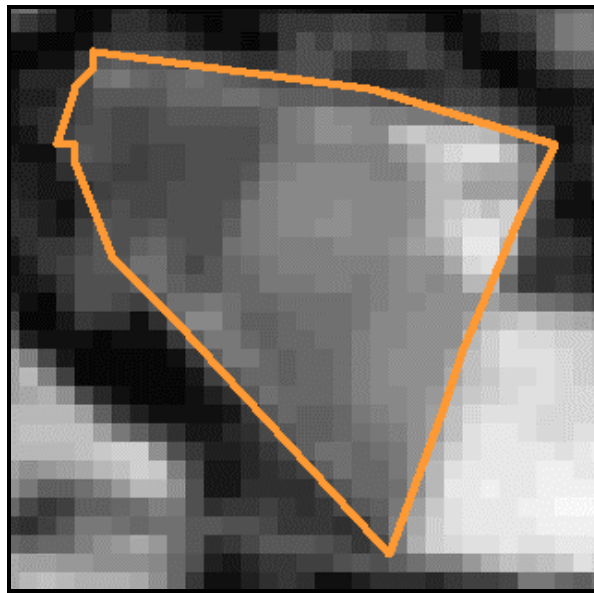


Abb. 25: Einzelkanal-Satellitenbild von Schlag 211 in IRS-1C Kanal 2 (01.09.97).

Die Verwendung der Ratios (*Kap.: 7.4.1*) soll den möglichen Einfluß der Bodenfeuchtigkeit und des Reliefs minimieren (*Kap.: 7.3.3*) und die Abgrenzung der Flächen unterschiedlicher Humusgehalte deutlicher hervorheben, wie es von FRAZIER ET AL. (1989) und WILCOX ET AL. (1994) erfolgreich an Landsat-TM Daten gezeigt wurde. Das Ergebnis dieser Datenkombination war für den untersuchten Schlag jedoch nicht sehr aussagekräftig. Es zeigte nicht die erwähnte Dreiteilung, sondern nur eine Differenzierung zwischen dem nordöstlichen Bereich und dem restlichen Schlag. Diese Abgrenzung war auch nicht so kontrastreich wie in den linearisierten Daten der IRS-Kanälen 1 und 2.

Dies kann möglicherweise darauf zurückzuführen sein, daß beide verwendeten Kanäle eine negative Korrelation mit dem Humusgehalt aufweisen; die besten Ratioergebnisse werden jedoch mit Kanälen erzielt, die auf eine Veränderung des betrachteten Parameters entgegengesetzt reagieren (VINCENT 1997). Bei den Untersuchungen von FRAZIER ET AL. (1989) konnten z. B. mit der Verwendung der Ratio aus TM-5 (MIR) und TM-4 gute Ergebnisse im Hinblick auf die quantitative Differenzierung des Humusgehalts erzielt werden. Bei einem Humusgehaltanstieg im Boden bleibt der TM-5 relativ unbeeinflusst, und die Reflexionswerte in TM-4 werden geringer. Das führt zu einer verbesserten Darstellung der Flächen höheren Humusgehalts.

Die Ratio aus den IRS-1C-Kanälen führte nicht zu der erhofften, verbesserten Darstellung, aber die Annahme, daß die spektrale Signatur des Schlages mit dem Humusgehalt korreliert,

wurde zumindest für die zwei Bereiche bestätigt, da der Relief- und Feuchtigkeitseinfluß minimiert worden ist. Mit der Verwendung eines Kanals aus dem MIR-Bereich wäre wahrscheinlich ein besseres Ergebnis zu erzielen (s. o.).

Auch wenn der hohe Humusgehalt an der Bodenoberfläche des Schlages kaum Aussagen über andere Bodeninhaltsstoffe und deren spektrale Information zuläßt (*Kap.: 6.1.1.1*), so ist es dennoch möglich, über existierende Korrelationen zwischen den verschiedenen Bodeninhaltsstoffen Rückschlüsse auf diese zu ziehen. Die in *Kapitel 8.2.2* erwähnten positiven Korrelationen des Stickstoff- und des Tongehaltes mit dem Humusgehalt lassen hinreichende Aussagen über den Wasserhaushalt und die Produktivität des Standortes zu. Mit Hilfe der Bodenart und des Humusgehalts läßt sich die Wasserspeicherfähigkeit (nFk) abschätzen. Fast alle physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Bodens werden vom Anteil und der Verteilung unterschiedlicher Bodenarten bestimmt (KUNTZE ET AL. 1994). Da der Tongehalt mit dem Gehalt an organischer Substanz korreliert, erhält man mit der Kenntnis über den Humusgehalt indirekt auch quantitative Angaben über den Tongehalt. Aus diesen lassen sich wiederum andere physikalische Bodeneigenschaften ableiten. Die Kenntnis über den Humusgehalt erlaubt ebenfalls Aussagen über den Stickstoffgehalt und die Produktivität des Bodens, da der Stickstoff in den meisten Fällen als limitierender Faktor bei der Pflanzenproduktion agiert. Es kann in der Regel davon ausgegangen werden, daß humusreiche Böden leistungsfähiger sind als humusarme Standorte.

In *Kapitel 8.1.1.5* und *8.1.1.7* wurde der Einfluß des Tongehalts auf die Reflexionsintensität im MIR gezeigt. Da dieser Aufnahmebereich bei dem IRS fehlt, kann nur über die Daten des Landsat-TM eine Aussage diesbezüglich getroffen werden. Aus den erwähnten Gründen sind diese Daten jedoch kritisch zu bewerten. In dem Bodensignaturdiagramm (*Abb.: 23*) zeigt sich für den MIR ein hoher Reflexionsunterschied zwischen dem Bereich III und den beiden anderen Bereichen, was auf dem Einfluß des Tons beruhen kann.

Der nordöstliche Hangbereich (Bereich I) zeigt in den Bodenuntersuchungsergebnissen deutlich erhöhte Carbonat- und Sandgehalte. Für beide Bodenparameter gilt, daß sie eine positive Korrelation mit der Reflexionsintensität besitzen. Die betroffene Fläche zeigt in dem Bodensignaturdiagramm der IRS-1C Daten deutlich höhere Reflexionswerte (*Abb.: 24*) als der Rest des Schlages. Der Unterschied in der Reflexionsbeeinflussung der beiden Stoffe liegt in dem Spektralbereich, in dem sie ihre größte Reflexionswirkung haben. Für den

Carbonatgehalt ist dies vor allem das sichtbare Spektrum, in dem die Reflexion erhöht wird (*Kap.: 6.1.1.3*). Diese Aussage wird z. B. in *Kapitel 8.1.1.1* bestätigt, und die Korrelation für den bearbeiteten Untersuchungsraum nachgewiesen. Der Sandgehalt wirkt dagegen wahrscheinlich insbesondere im mittleren Infrarot (MIR) reflexionsfördernd (*Kap.: 8.1.1.4*). Die geringeren Humusgehalte in dem Bereich I sorgen gleichzeitig für eine geringere Absorption der elektromagnetischen Strahlung.

Die Bodensignaturanalyse der IRS-Daten (*Abb.: 24*) zeigt einen eindeutigen Intensitätsunterschied im Bereich des sichtbaren Wellenlängenspektrums. Dies deutet mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Reflexionswirksamkeit der hohen Carbonatgehalte im Bereich I hin. Die durch Sand hervorgerufenen Intensitätsunterschiede zeigen in *Kapitel 8.1.1.4* dagegen kaum erkennbare Auswirkungen im sichtbaren Spektrum.

In der IRS-Kanal-2 Abbildung des Schlages 211 (*Abb.: 25*) wird der Einfluß des Carbonats noch einmal verdeutlicht. Die am östlichen Rand gemessenen Gehalte von 30-40% sind eindeutig als die hellsten, d. h. reflexionsstärksten Pixel zu erkennen. Ab 25% wird dem Carbonat eine dominierende Reflexionswirkung zugesprochen (vgl. *Kap.: 6.1.1.3*), wobei alle anderen reflexionswirksamen Parameter in ihrem Einfluß unterdrückt werden.

8.3 Zusammenfassende Diskussion der Analyseergebnisse

Die in der Arbeit verwendeten Fernerkundungsdaten unterliegen verschiedenen äußeren Einflüssen, welche in verschiedener Art und Weise zu einer Veränderung der spektralen Information der betrachteten Objekte führen. Von diesen Einflüssen wurden vor der Bearbeitung nur wenige korrigiert oder minimiert, so daß ihre Wirkung bei der Analyse der Daten immer bedacht werden muß.

Die geometrische Lagegenauigkeit der Satellitendaten wurde mit der Geokodierung auf das Gauß-Krüger Referenzsystem hergestellt. Die atmosphärischen Einflüsse wurden über ein Näherungsverfahren minimiert, aber nicht vollständig eliminiert, so daß durchaus noch mit einer Informationsverfälschung der Reflexionsstrahlung in den interpretierten Daten gerechnet werden muß. Weitere äußere Einflüsse, wie die Illumination oder das Relief wurden nicht berücksichtigt. Für die Interpretation wurde die Information der Topografischen Karten zwar herangezogen, doch nicht als digitaler, topografischer Datensatz in die automatische

Klassifikation integriert. Diese Verfahrensweise würde wahrscheinlich zu besseren Klassifizierungen führen (LEE 1988, SU 1989), da insbesondere die Belichtungsunterschiede berücksichtigt würden. Die aufgrund der anthropogenen Nutzung entstehenden Strahlungsmanipulationen, insbesondere durch Ernterückstände (ELVIDGE 1990) und Bodenbearbeitung, konnten nicht berücksichtigt werden, da entsprechende Daten zum Aufnahmezeitpunkt nicht flächendeckend verfügbar waren. Über die starke Reflexionswirksamkeit der Bodenbearbeitung läßt sich im Rahmen der Interpretation nur eine Vermutung aufstellen, die es gilt in weiteren Untersuchungen nachzuprüfen.

Die erarbeiteten Interpretationsergebnisse der Signaturanalyse und die Klassifikationsergebnisse müssen immer vor dem Hintergrund der geringen, im Hinblick auf reflexionswirksame Bodenparameter meist unzureichenden, Datengrundlage betrachtet werden. Für die Interpretation der kleinräumigen, spektralen Heterogenitäten konnte im Grunde genommen nur die Information der RBS herangezogen werden, da in der MMK maßstabsbedingt keine kleinräumigen Bodenunterschiede aufgeführt sind. Trotz der geringen Datengrundlage konnten interessante Korrelationen zwischen multispektraler Information und Kartenmaterial, sowie vorhandenes zusätzliches Informationspotential der Fernerkundungsdaten aufgedeckt werden. Für den Fall der differenzierten Bodenanalyse konnten reflexionsbedingte Zusammenhänge, die in der Literatur beschrieben sind, bestätigt werden. Korrelationen verschiedener Bodenparameter bilden ein Informationspotential, mit dem über die Lokalisierung und quantitative Abgrenzung reflexionswirksamer Bodenparameter auf andere Bodeneigenschaften und Bodenbestandteile geschlossen werden kann, die durchaus für landwirtschaftliche Zwecke interessant sein können.

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse noch einmal zusammengefaßt. Die Ergebnisse wurden auf zufällig ausgewählten, repräsentativen Testflächen erzielt. Ob sie eine allgemeine Gültigkeit in dem Untersuchungsraum haben, müßte jedoch weiter untersucht werden.

- Der räumliche Informationsvergleich von Karte und Satellitendaten zeigt teilweise relativ genaue Übereinstimmungen. Die in der RBS eindeutig unterschiedlichen Klassenflächen auf einem Schlag lassen sich durchaus in den spektralen Abbildungen nachvollziehen. Der Informationsgehalt zur räumlichen Abgrenzung heterogener Flächen erscheint in den Fernerkundungsdaten sogar höher. Die Grauwertverteilung der spektralen Aufzeichnungen

weist teilweise eine stärkere räumliche Differenzierung innerhalb der Klassengrenzen der RBS auf. Diese Variabilität innerhalb einer Bodenklasse wurde auch von HIERHOLD (1992) festgestellt.

- Die visuelle Trennung von Bodenflächen unterschiedlichen geologischen Ausgangsmaterials aufgrund spektraler Unterschiede ist schlagintern möglich. Für weiter auseinanderliegende Schläge eines größeren Untersuchungsgebietes kann diese Abgrenzung anhand multidimensionaler Merkmalsvektoren über die unüberwachte Clusteranalyse erfolgen. Akzeptable Ergebnisse wurden jedoch nur mit dem *Fuzzy-K-means* Klassifikator erreicht. Die *Iso-Data* und *K-means* Methode erwiesen sich für diesen Zweck als ungeeignet.
- Die überwachte Klassifikation (*Maximum-Likelihood*) des gesamten Untersuchungsraums im Hinblick auf das geologische Ausgangsmaterial lieferte für zwei Trainingsklassen ein gutes Ergebnis. Die Wahl differenzierterer Klassen führte zu einer geringeren Klassifikationsrate und das Ergebnis ließ sich nicht anhand der Datengrundlage nachvollziehen. Die den Trainingsklassen zugrundeliegenden Kriterien (aus der RBS) konnten nicht unbedingt in den klassifizierten Flächen entdeckt werden. Es ist aber möglich, Lößgebiete und Verwitterungsbodenstandorte in einem größeren Untersuchungsgebiet mit einer hohen Genauigkeit von einander abzugrenzen.
- Die Fehlklassifikationen, bzw. die Zuordnungen in die Zurückweisungsklasse, ist aller Wahrscheinlichkeit nach auf die manipulierenden, äußeren Einflüsse zurückzuführen. Insbesondere der Bodenbearbeitung (Rauigkeit) kann vermutlich ein starker Einfluß zugeschrieben werden. Mit der Berücksichtigung dieses Faktors in der Klassifikation kann das Ergebnis höchstwahrscheinlich verbessert werden. Der Einfluß der äußeren Gegebenheiten konnte aber nicht geklärt werden, da die unterschiedliche spektrale Signatur durchaus auch auf differenten Oberflächeneigenschaften beruhen kann, die in der RBS nicht aufgeführt sind. Die Überprüfung ist jedoch nur mit einer genauen, vor Ort vorgenommenen Bodenanalyse möglich.

Aufgrund fehlender Angaben zu reflexionswirksamen Bodenparametern können die spektralen Bodensignaturen einzelner Schläge im Grunde genommen nur mit den Bodenparametern in Verbindung gebracht werden, die in der RBS enthalten sind. Aus dem

Kartenwerk lassen sich diesbezüglich insbesondere Informationen zu der Bodenfraktion entnehmen. Hier lassen sich vor allem ton- und sandhaltige Standorte von den überwiegend lehmigen Böden des Untersuchungsgebietes abgrenzen. Des weiteren läßt sich entnehmen, auf welchen Flächen das mineralische Gestein nur mit einer geringen Lößdeckschicht bedeckt ist. Aufgrund des hohen Carbonatgehalts des Ausgangsgesteins im Untersuchungsraum kann ein hoher Carbonatgehalt an der Bodenoberfläche auf Erosionsprozesse hindeuten, da die landwirtschaftlichen Nutzflächen in Deutschland aufgrund von Auswaschungsprozessen in der Regel kaum Carbonat im Oberboden enthalten.

- Ein erhöhter Tongehalt im Oberboden zeichnet sich vor allem im Aufnahmespektrum des MIR durch eine erhöhte Absorption gegenüber den Lehmböden aus. In den Teilspektren des VIS und des NIR liegen in der Regel ebenfalls geringere Reflexionswerte vor. Entsprechende Standorte lassen sich sowohl visuell, als auch über die unüberwachte Klassifikation innerhalb einzelner Schläge abgrenzen. In der überwachten Klassifikation ist dies nur bedingt möglich, da die äußeren Einflüsse das spektrale Signal verfälschen.
- Erhöhte Sandgehalte zeigen in dem Aufnahmebereich des MIR dagegen eine weitaus höhere Reflexion gegenüber den Lehmböden. Auch im NIR zeigt sich eine erhöhte Reflexionsintensität, wobei sie im VIS nahezu identisch ist. Entsprechende Standorte lassen sich sowohl visuell, als auch über die unüberwachte Klassifikation innerhalb einzelner Schläge abgrenzen.
- Es lassen sich sowohl in der visuellen, als auch der unüberwachten Klassifikation eindeutige räumliche Zusammenhänge zwischen den in der RBS gekennzeichneten Standorten mit einer geringen Lößdeckschicht (LöV) und einer veränderten spektralen Reflexion ausmachen. Diese Gebiete lassen auf an die Oberfläche getretenes Ausgangsgestein schließen. Aufgrund des sehr kalkhaltigen Ausgangsmaterials sind diese Flächen sehr gut im sichtbaren Aufnahmespektrum zu lokalisieren, in dem das Carbonat seine größte Reflexionswirksamkeit entfaltet. Es ist daher davon auszugehen, daß diese Flächen starken Erosionsprozessen unterliegen. Erodierte Flächen sind demnach sehr gut in den vorhandenen spektralen Aufzeichnungen zu erkennen (BRIX 1997, LEONE ET AL. 1995).

Ob die spektralen Differenzen direkt auf die Kornfraktion zurückzuführen sind, oder auf etwaigen Korrelationen der Kornfraktion mit anderen Bodenparametern beruhen (z. B. Humusgehalt) konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht allgemeingültig geklärt werden. Offensichtlich ist nur die geografische Übereinstimmung der spektralen Variabilität mit den entsprechenden Klassen der RBS. Aussagen über den Einfluß anderer Parameter auf die Reflexion des Bodens konnten nur anhand der Bodenanalyse vorgenommen werden, die für einen Schlag vorlag. Auf der Basis des vorher erarbeiteten Wissens über die Reflexionseigenschaften verschiedener Bodenparameter und bodenkundlichen Grundkenntnissen konnten folgende Zusammenhänge der Bodendaten mit den IRS-1C Aufnahmen eindeutig festgestellt und interpretiert werden:

- Es liegt eine eindeutige Korrelation des Humusgehalts mit der Reflexionsintensität der Bodenoberfläche in den Aufnahmekanälen des VIS und des NIR vor. Insbesondere bei Gehalten $> 2\%$ läßt sich diese Beziehung nachweisen und die Aussagen in der Literatur bestätigen. Die dominierende Reflexionswirksamkeit der organischen Substanz ermöglicht quantitative Flächenabgrenzungen in Bezug auf den Humusgehalt.
- Andere Bodenparameter weisen eine ähnliche räumliche Verteilungsstruktur auf, die sich ebenfalls mit der Grauwertstruktur der Scanneraufzeichnungen deckt. Den meisten untersuchten physikalischen und chemischen Parametern wird kaum, bzw. keine Reflexionswirksamkeit zugeschrieben. Ihr Gehalt steht aber größtenteils in einem engen Zusammenhang mit dem Humusgehalt. Die Möglichkeit der quantitativen Flächenabgrenzung über die spektrale Eigenschaft der organischen Substanz läßt auch Aussagen über die mit ihr korrelierenden Parameter zu.
- Der dominierende Reflexionseinfluß des Calciumcarbonats bei einem Gehalt von $> 25\%$ kann in der Untersuchung nachgewiesen und bestätigt werden.

Eine genaue Bodenanalyse, die einer Interpretation von Fernerkundungsdaten genügt, ist sehr arbeits-, zeit- und kostenintensiv. Es ist nicht möglich, für jeden einzelnen Schlag einen solchen Arbeitsaufwand zu betreiben. Eine Möglichkeit der Datenerhebung ist die der Stratifikation, mit welcher der Arbeitsaufwand minimiert werden kann. Die für eine Stratifikation notwendige objektive Einteilung einer Gesamtfläche (Schlag) in verschiedene homogene Teilgebiete (Straten) kann mit der Clusteranalyse vorgenommen werden. Das

Untersuchungsergebnis zeigt deutlich die Möglichkeit der automatischen Abgrenzung visuell interpretierbarer Teilflächen eines Schlates anhand seiner multidimensionalen Merkmalsvektoren. Die Größe der Klassenflächen läßt sich dabei problemlos mit der Veränderung der Klassenanzahl variieren. Für die Zukunft wäre es sinnvoll, anhand einer solchen Stratifikation die erarbeiteten Ergebnisse vor Ort anhand von Bodenuntersuchungen zu überprüfen und weitergehende, genauere Unterteilungen der Teilschläge vorzunehmen, um das Informationspotential, welches in den multispektralen Aufzeichnungen steckt, ermitteln zu können.

Ein Zusammenhang zwischen den Bodenwerten und der spektralen Signatur der Teilflächen, wie sie GLASER (1989) in seinen Untersuchungen ermittelte, konnte nur teilweise nachgewiesen werden. Auf einigen Testschlägen lagen solche Zusammenhänge vor, die durch reflexionswirksame Bodenparameter in diesen Bereichen hervorgerufen werden. Zu den Gebieten mit niedrigen Bodenwerten im Untersuchungsraum sind die LÖV-Flächen und die Bereiche mit einem höheren Tonanteil (LT) zu zählen. Es liegt aber keine allgemein gleichgerichtete Korrelation der Bodenwerte mit der Reflexionsintensität vor.

Ob die über Reflexionsunterschiede lokalisierbaren Bodenheterogenitäten Einfluß auf die biotische Ertragsfunktion des jeweiligen Teilschlages haben, muß über den multitemporalen Vergleich von Satellitenaufnahmen überprüft werden. Aufnahmen aus der Vegetationsperiode können Aufschluß über die Wachstumsbedingungen liefern, wobei sich nicht jede Bodenheterogenität, aufgrund der ökologischen Valenz der Vegetation, im Pflanzenbestand niederschlagen muß.

Zum Abschluß soll noch eine Stellungnahme zu dem Informationspotential der beiden untersuchten Aufnahmesysteme erfolgen. Aufgrund der beschriebenen Ergebnisse wird deutlich, daß insbesondere im Aufnahmespektrum des mittleren Infrarots ein hoher Anteil an differenzierender Information enthalten ist. Dies gilt insbesondere für die Kornfraktion eines Bodens, über die sich pflanzenbaurelevante Standortkenntnisse erschließen lassen. Aufgrund dieser Tatsache hat der Landsat-TM ein weitaus größeres Informationspotential für bodenkundliche Anwendungen als es der IRS-1C bieten kann.

9 Fazit und Blick in die Zukunft

Die Vorteile der Datenaquisition durch die Geofernerkundung liegen in der Aktualität, der zeitlichen Kontinuität und der großräumigen Betrachtung, die auf keine andere Art und Weise bereitgestellt werden können. Insbesondere für Gebiete ohne Kartengrundlagen stellen sie teilweise die einzige Möglichkeit dar, entsprechendes Datenmaterial zu erheben.

Die in der Untersuchung ermittelten Ergebnisse zur Lokalisierung von Bodenheterogenitäten sind recht vielversprechend. Es ist ersichtlich, daß durch multispektrale Fernerkundungsdaten durchaus ein hohes Informationspotential über die Bodenoberfläche bereitgestellt wird. Die starke Korrelation der organischen Substanz mit der Absorptionsintensität in Regionen mit hohem Humusgehalt läßt weitreichende Aussagen über die jeweiligen Standorteigenschaften zu, da nahezu sämtliche pflanzenbaurelevanten Standortparameter mit dem Gehalt an organischer Substanz im Bodenkörper korrelieren. Die abgrenzbaren Teilschläge lassen sich jedoch nur ordinal in Beziehung setzen. Ebenfalls sehr vielversprechend sind die Möglichkeiten in der Lokalisierung und Beobachtung erosiver Prozesse, insbesondere auf carbonatreichem Ausgangsgestein.

Im Hinblick auf die Datenerhebung für ein effizientes Teilschlagmanagement muß die Fernerkundung sehr kritisch und differenziert betrachtet werden. Aufgrund der im allgemeinen geforderten Informationsdichte von 5 m bis 20 m ist bei den Landsat-TM und IRS-1C Systemen nur von einer ungenügend geografisch auflösenden Datenbereitstellung auszugehen. Dies gilt insbesondere für den multispektralen Bereich. In den panchromatischen Daten des IRS-1C liegt die geografische Auflösung mit 5 m im geforderten Bereich. Mit Flugzeugscanneraufzeichnungen (z. B. MKF-6, DAEDALUS) kann dagegen multispektrales Datenmaterial bereitgestellt werden, daß den Ansprüchen des Teilschlagmanagements an die räumliche Auflösung gerecht wird (SCHRÖDER 1988, 1989). Ende des Jahres 1998 sollte das kommerzielle europäische Satellitensystem IKONOS I in seine Erdumlaufbahn gebracht werden, das panchromatische Daten mit 1 m und multispektrale Daten mit 4 m Auflösung liefert und eine radiometrischen Auflösung von 11bit, d. h. 2048 Grauwerten hat (www.Kodak.de/US/en/government/ias/heritage/ikonos1.shtml). Der Start des Satelliten schlug jedoch im April 1999 fehl. Dieselben technischen Daten gelten auch für das

amerikanische Satellitensystem Quickbird I (KRAMER 1996), das 1999 einsatzbereit sein und in die Umlaufbahn geschickt werden soll (www.digitalglobe.com). Durch diese technische Weiterentwicklung kann zumindest die Restriktion durch die geometrische Auflösung der Daten im Hinblick auf die Verwendung für ein Teilschlagmanagement eliminiert werden.

In der Literatur ist man sich im Grunde genommen einig darüber, daß die in der Verarbeitung und Auswertung von Satellitendaten gängigen Klassifizierungsverfahren geeignet sind, um mit derzeitigen Aufnahmesystemen Klassifizierungen zu erstellen (u. a. KORLYUK 1994, LEONE ET AL. 1995, BRIXY 1997).

Neben der räumlichen Abgrenzung heterogener Teilflächen, die überwiegend durch die räumliche Auflösung des Aufnahmesystems bestimmt wird, besteht das Problem der Interpretation der inhaltlichen Heterogenität der abgrenzbaren Teilräume. Die für das Teilschlagmanagement notwendigen pflanzenbaurelevanten Standortinformationen können nur bedingt aus den Fernerkundungsdaten entnommen werden. Nicht alle in diesem Zusammenhang interessierenden Standortparameter sind reflexionswirksam, so daß direkte Aussagen aufgrund der spektralen Eigenschaft des Bodens getroffen werden können. Über diese Parameter kann nur eine quantitative Aussage gemacht werden, wenn eine spezifische Korrelation mit einem reflexionswirksamen Parameter vorliegt. Das schwerwiegendste Problem bei der Interpretation der Standorteigenschaften besteht darin, daß die Fernerkundung lediglich Informationen über die Bodenoberfläche liefert. Erkenntnisse über den Profilaufbau und die Bodeneigenschaften der unteren Bodenschichten lassen sich nur bedingt erschließen. Diese sind jedoch z. B. für die Nährstoffversorgung des Standortes von großer Bedeutung (KUNTZE ET AL. 1994).

Eine hinreichende Datengrundlage für die korrekte Interpretation der Fernerkundungsdaten kann nur über eine parallel ablaufende Bodenanalyse bereitgestellt werden. Die umfangreiche Datenerhebung im Feld kann jedoch durch eine vorherige Clusterung der spektralen Datensätze in spektral homogene Teilgebiete (Straten) rationalisiert werden. Der gesamte Rationalisierungseffekt durch die Verwendung der Fernerkundung im Rahmen der Datenerhebung hängt im großen und ganzen davon ab, ob es möglich ist, Erkenntnisse aus einem Untersuchungsgebiet auf ein anderes zu übertragen, ohne daß dort wieder eine umfangreiche Ground truth erhoben werden muß. Aufgrund fehlender, allgemeingültiger Interpretationsschlüssel scheint dieses zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch sehr fraglich, auch

wenn BRIXY (1997) und HILL (1996) nach ihren Untersuchungsergebnissen durchaus davon ausgehen, daß ihre Interpretationsmethoden für identische oder annähernd gleiche naturräumliche Gegebenheiten anwendbar sind.

Die technische Entwicklung der Aufnahmesysteme geht hin zu einer besseren geometrischen und radiometrische Auflösung. An dem IKONOS-System ist aber ersichtlich, daß keine Entwicklung in der spektralen Auflösung erfolgt. Die Bandbreiten der Aufnahmekanäle bleiben in bekannter Breite erhalten und können nicht für die Lokalisierung stoffspezifischer Absorptionsmuster verwendet werden. Des weiteren wird deutlich, daß hauptsächlich die Vegetationsbedeckung im Vordergrund des Interesses steht. Die Erkenntnis, daß insbesondere im MIR ein hohes Informationspotential für bodenkundliche und geologische Fragestellungen enthalten ist, wurde bei der Konzeption der neuen Systeme nicht berücksichtigt. Diese Entwicklung ist sehr schade, wenn man bedenkt, daß es im Rahmen des Ressourcenschutzes, insbesondere in Ländern der Dritten Welt, der Bekämpfung von Erosions- und Versalzungserscheinungen besondere Bedeutung zu kommt. Auch in mitteleuropäischen Breiten könnten Fernerkundungsdaten über den Boden im Rahmen der Optimierung der Pflanzenproduktion und daraus folgend des Umweltschutzes durchaus einen wichtigen Beitrag leisten.

10 Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde als Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin, Studiengang Landschaftsplanung, angefertigt. Die Bearbeitung erfolgte im Hause der Jenaoptronik GmbH in Jena, welche die der Arbeit zugrundeliegende Fragestellung im Rahmen des Projektes HOLT - Nutzung Hochauflösender Satellitendaten für die Aufgaben der Landwirtschaftsverwaltung Thüringens – als Diplomarbeitsthema anbot.

Bedanken möchte ich mich deshalb insbesondere bei Frau Diplom Mathematikerin Kathrin Weise für die fachliche Betreuung bei der Jenaoptronik GmbH. In diesem Zusammenhang gilt mein Dank auch allen anderen Mitarbeitern der Firma, die mir stets mit Rat und Tat bei aufgetretenen Problemen zur Seite standen. Des weiteren bedanke ich mich bei der Jenaoptronik GmbH für die zur Verfügungstellung der verwendeten Hard- und Software, sowie der Satellitendaten, die in der Arbeit Verwendung fanden.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn Dr. Werner von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) für die fachliche Hilfestellung und die konstruktiven Anregungen die sehr zum Gelingen der Arbeit beitrugen.

Herrn Professor Kenneweg danke ich für die Übernahme des Themas und den großen Freiraum bei der Durchführung dieser Arbeit, sowie der Hilfsbereitschaft zur Klärung inhaltlicher Fragen und zielgerichteter Kritik.

Literaturliste

- AGBU, P.A., OLSON, K., 1992: Model to predict soil parent material underlying a loess mantle in illinois from Satellite data. - IN: Soil Science, Vol. 153 No. 2, 142-148.
- AL-ABBAS, A.H., SWAIN, P.H., BAUMGARDNER, M.F., 1972: Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance of soils. - IN: Soil Science Vol. 114, No. 6, 477-485.
- ALAILY, F., POHLMANN, J., 1983: Eine flächenhafte Erfassung von Bodengesellschaften arider Gebiet mit Hilfe von Landsat – Multispektralaufnahmen. - IN LIST, F.K. und MEIBNER, B., HRSG.: Fernerkundung der Erde an der FU Berlin. - Berliner geowiss. Abh., A 47, Berlin.
- ALBERTZ, J., 1991: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, Darmstadt.
- ALTERMANN, M., 1992: Die Nutzung der Bodenschätzung zur Erarbeitung von Lokalbodenformenkarten und Betriebsstandortkarten für ausgewählte Gebiete Sachsen-Anhalts. – IN: Mitt. Deutscher Bodenkundl. Ges., Bd 67, 175-179, Oldenburg.
- AMLER, B., 1992: Landnutzungsplanung für Entwicklungsländer – Methoden der Standorteignungsbewertung und Landnutzungsplanung für den ländlichen Raum in Entwicklungsländern. - IN: Landschaftsentwicklung und Umweltforschung, Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsentwicklung der TU-Berlin, Nr.: 85.
- AMON, H., 1994: Abgrenzung und Bewirtschaftung von Teilschlägen mit Hilfe von Fernerkundung und Elektronik, Braunschweig.
- AMON, H., 1994b: Ergebnisse des FuE-Vorhabens „Einführung der Elektronik für die Außenwirtschaft in der Praxis“ – Bereich Software und Pflanzenbau. – IN: KTBL AG 1994: Globales Positionierungssystem: Einsatz des Globalen Positionierungssystems in der Landwirtschaft - Nutzungsmöglichkeiten und Anforderungen. Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft. Arbeitspapier 175.
- ANTROP, M., 1983: Inventoring and Monitoring of Landscape as a Natural and Cultural Resource. – ESA SP – 188, 105-113.
- ANUTA, P.E., BARTOLUCI, L.A., DEAN, M., LOZANO, D.F., MALARET, E., MCGILLEM, C.D., VALDES, J.A., VALENZUELA, C., 1984: Landsat-4 MSS and Thematic Mapper Data Quality and Information Content Analysis. - IN: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-22, No. 3, 222-228.
- ASRAR, G., (HRSG.) 1989: Theory and applications of optical Remote Sensing, New York.
- BACKHAUS, H. (HRSG.) 1995: Umwelt und Fernerkundung – Was leisten integrierte Geo-Daten für die Entwicklung und Umsetzung von Umweltstrategien?, Heidelberg.
- BÄHR, H. P. (HRSG.) 1985: Digitale Bildverarbeitung, Anwendung in Photogrammetrie und Fernerkundung, Karlsruhe.
- BASTEN, M., LAMP, J., 1994: Eignung von Stickstoffmodellen für die rechnergestützte Pflanzenproduktion (CAF). – IN: KTBL AG 1994: Globales Positionierungssystem: Einsatz des Globalen

- Positionierungssysteme in der Landwirtschaft - Nutzungsmöglichkeiten und Anforderungen. Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft. Arbeitspapier 175.
- BAUMGARDNER, M.F. ET.AL., 1970: Effects of organic matter on multispectral properties of soils. - IN: Proc. Ind. Acad. Sci. 79.
- BAUMGARDNER, M.F., SILVA, L.F., BIEHL, L.L., STONER, E.R. 1985: Reflectance properties of soils IN: Advances in Agronomy 38, 1-44.
- BAYER, I., 1992: Integration of ancillary forest data for the enhancement of forest decline evaluation with Landsat TM data. - IN: Application of remote sensing and geographic Information Systems in Environmental and Natural Resources Management and Monitoring – Report of a Training Course 1992, BAYER, I., RUNKEL, M. (Hrsg.), 166-190, Feldafing.
- BAYER, I., RUNKEL, M., (HRSG.) 1992: Application of remote sensing and geographic Information Systems in Environmental and Natural Resources Management and Monitoring – Report of a Training Course 1992, Feldafing.
- BEDIDI, A., CERVELLE, B., MADEIRA, J., POUGET, M., 1991: Moisture effects on spectral characteristics (visible) of lateritic soils. – IN: Soil science.
- BEGNI, G., 1982: Selection of the Optimum Spectral Bands for the SPOT Satellite. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 48, No. 10, 1613-1620.
- BEN-DOR, E., BANIN, A., 1995: Quantitative analysis of convolved Thematic Mapper spectra of soils in the visible near-infrared and shortwave-infrared spectral regions (0,4-2,5 μm). - IN: Int. J. of Remote Sensing, Vol. 16, No. 18, 3509-3528.
- BENNE, I., HEINEKE, H.-J., NETTELMANN, F., 1990: Die DV-gestützte Auswertung der Bodenschätzung. – IN: Technische Berichte zum NIBIS, Hrsg.: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- BILL, R., GRENZDÖRFER, G., MACK, J., 1996: Precision Farming - ein Konzept für eine moderne technikgestützte Landbewirtschaftung in Mecklenburg-Vorpommern. - IN: Rostocker Agrar- und Umweltwissenschaftliche Beiträge, Heft 6 (<http://www.agr.uni-rostock.de/~grenz/precfarm.htm>).
- BOLLE, H.J., 1971: Einfluß der Atmosphäre auf die Erkundung von Erdoberflächensignaturen. - IN: Dt. Ges. f. Luft- und Raumfahrt, DGLR-Symposium Fernerkundung der Erdoberfläche, DGLR-Mitt. 72-10, 43-95.
- BOLLE, H.J., 1975: Physikalische Grundlagen der Fernerkundung. Symp. Erderkundung, DFVLR: 11-25, Köln.
- BOWERS, S.S., HANKS, R.J.M., 1965: Reflection of radiant energy from soils. - IN: Soil Sc., No.100, 130-138.
- BRAUN, G., 1995: Integration von Fernerkundungs- und Modelldaten für die Renaturierung von Einzugsgebieten. - IN: Umwelt und Fernerkundung – Was leisten integrierte Geo-Daten für die Entwicklung und Umsetzung von Umweltstrategien?, 1995, BACKHAUS, H. (Hrsg.), Heidelberg.

- BRIXY, I., 1997: Erfassung erosionsgeschädigter Böden in der Lößlandschaft des Querfurter Raumes im Mitteldeutschen Trockengebiet anhand von Daten des Landsat Thematic Mapper. - IN: Mitt. Deutscher Bodenk. Ges. 1997, 395-398.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 1995: Eurokurs zur Fernerkundung vom 17.-19.10.1995 in Biberach: Auswertung von Luftbildern, Möglichkeiten, Grenzen, Beispiele.
- BUTTNER, G., CSILLAG, F., 1989: Comparative study of crop and soil mapping using multitemporal and multispectral SPOT and Landsat Thematic Mapper data. - IN: Remote Sensing of Env., Vol. 29, 241-249.
- CHAVEZ, P.S., BERLIN, G.L., SOWERS, L.B., 1982: Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. J. of Appl. Photographic Eng. Vol. 8, 23-30.
- CIERNIEWSKI 1987: A model for soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the VIS and near infrared range. – IN: Remote Sensing of Env. Vol. 23, 98-115.
- COLEMAN, T.L., AGBU, P.A., MONTGOMERY, O.L., GAO, T., PRASAD, S., 1991: Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. – IN: Soil Science Vol. 151, No. 5, 355-361.
- COLEMAN, T.L., 1985: Spectral classification of soil characteristics to aid soil survey. IN: ACARS Technical Report No 013185 Alabama A+M University.
- COLEMAN, T.L., MONTGOMERY, O.L., 1987: Soil moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristic of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. - IN: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 53, 1659-1663.
- COLEMAN, T.L., TADESSE, W., 1995: Differentiating soil physical properties from multiple band DOQ data IN: Soil Science Vol. 160, No. 2, 81-91.
- COLEMAN, T.L., AGBU, P.A., MONTGOMERY, O.L., 1993: Spectral Differentiation of surface soils and soil properties - is it possible from space platforms? - IN: Soil Science Vol. 155, No. 4, 283-293.
- CONDIT, H.R. 1970: The spectral reflectance of american soils. – IN: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 36, 955-966.
- CORDSEN, E. ET AL. 1992: Bodenschätzung und Bodenschutz. - IN: Mitt. Deutscher Bodenkundl. Ges. Bd. 67, 197-200.
- CURRAN P.J., FOODY, G.M., KONDRATYEV K.YA. KOZODEROV V.V., FEDCHENKO P.P., 1990: Remote Sensing of soils and vegetation in the USSR, Basingstoke.
- DEUTSCHER WETTERDIENST 1997: Agrarmeteorologischer Wochenbericht für Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen, Geschäftsfeld Landwirtschaft, Außenstelle Halle.
- DEUTSCHER WETTERDIENST 1997: Monatlicher Wochenbericht, Offenbach.
- DOCKTER, K., 1995: Die gegenseitige Beeinflussung von Landwirtschaft und Umwelt. - IN: Umwelt und Fernerkundung – Was leisten integrierte Geo-Daten für die Entwicklung und Umsetzung von Umweltstrategien?, 1995, BACKHAUS, H. (Hrsg.), Heidelberg.

- DWIVEDI, R.S. RAO, B.R.M., 1992: The selection of the best possible Landsat Thematic Mapper band combination for delineating salt-affected soils. - IN: Int. J. of Remote Sensing, Vol. 13, No. 11, 2051-2058.
- DWIVEDI, R.S., RAVI SANKAR, T., VENKATARATNAM, L., 1997: The Inventory and monitoring of eroded lands using remote sensing data. - IN: Int. J. Remote Sensing, Vol. 18, No. 1, 107-119.
- EHLERT, D., WAGENER, N., 1997: Schluß mit dem Gießkannenprinzip. - IN: DLZ Sonderheft 10, 24-27.
- EINIG, K., GÖSSEL, J. SIEDENTOP, S., 1997: Nutzung von CORINE - Daten zur Verfolgung des Verstärkerungsprozesses in ostdeutschen Ballungsräumen. IN: GIS 1/97, 16-20.
- ELVIDGE, C. D., 1990: Visible and near-infrared reflectance characteristics of dry plant material. - IN: Int. J. of Remote Sensing, Vol. 11, No. 10, 1775-1995.
- ESCADAFAL, R., GIRARD, M.C., COURAULT, D., 1989: Munsell soil color and soil reflectance in the Visible Spectral Bands of Landsat MSS and TM Data. - IN: Remote Sensing of Env. Vol. 27, 37-46.
- FRASER, S., GREEN, A.A., 1987: A software defoliant for geological analysis of band ratios. - IN: Int. J. of Remote Sensing, Vol. 8, 525-532.
- FRAZIER, B.E., YAAN-CHENG 1989: Remote Sensing of soils in Eastern Palouse region with Landsat Thematic Mapper. - IN: Remote Sensing of Env. Vol. 28, 317-325.
- FREUND, K.L., 1992: Grundlagen, Ziele und Durchführung der Bodenschätzung. - IN: Mitt. Deutscher Bodenkundl. Ges. 67, 213-219.
- FRÖHLICH, S., (HRSG.) 1997 Luftbildarchäologie in Sachsen-Anhalt, Begleitband zur Sonderausstellung im Landesmuseum für Vorgeschichte in Halle, Halle.
- GAH, E., 1995: Signaturanalyse und Klassifikation von Landnutzungsformen mit multitemporalen ERS-1 SAR Daten im Raum Prenzlau, Diplomarbeit an der TU-Berlin, Fachbereich Umwelt und Gesellschaft, Institut für Landschafts- und Freiraumplanung.
- GLASER, R., 1986: Fernerkundung mit Landsat 5 TM – Anwendungsmöglichkeiten am Beispiel von Würzburg und Umgebung, auch unter Berücksichtigung verschiedener Planungsebenen, DFLVR Wissenschaftlicher Bericht, Oberpfaffenhofen.
- GÖTTING., H. R., 1982: Fernerkundung mit Landsat sowie die digitale Bildverarbeitung der Daten zur Herstellung einer Landnutzungskarte des Landkreises Tübingen im Maßstab 1:50000, DFLVR-FB 82-30, Oberpfaffenhofen.
- GUPTA, R., 1991: Remote Sensing in Geology, Heidelberg, Berlin.
- HAASE, G. SCHMIDT, R., 1975: Struktur und Gliederung der Bodendecke der DDR. - IN: Petermanns Geogr. Mitteilungen 119, 279-300.
- HABERÄCKER, P., 1995: Praxis der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung, München.

- HASSENPFUG, W., RICHTER, G., 1972: Formen und Wirkungen der Bodenabspülung und –verwehung im Luftbild. Landeskundliche Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum, Heft 10, Bonn.
- HENDERSON, T.L., SZILAGYI, A. BAUMGARDENER, M.F., HHEN, T., LANDGREBE, D.A., 1989: Spectral band selection for classification of organic matter content. - IN: Soil Science Soc. of Am. J. No 53, 1778-1784.
- HIEROLD, W., 1992: Erfahrungen bei der Nutzung von Bodenschätzungsdaten für Bodenkartierung und Bodenbewertung auf Standorten verschiedener Entstehungsarten. - IN: Mitt. Deutscher Bodenkundl. Ges. Bd 67, 221-224.
- HILDEBRANDT, G., 1976: Die spektralen Reflexionseigenschaften der Vegetation. – IN: Proc. XVI. IVFRO World Congress, Oslo, 9-22.
- HILDEBRANDT, G., 1996: Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie, Heidelberg.
- HILDEBRANDT, R., 1992: Digitale und visuelle Interpretation von Landsat TM und SPOT-Daten sowie Luftbildern in Hinblick auf die Geologie in der Region des Jebel Marra, Dissertation an der FU-Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Berlin.
- HILL, J. (HRSG.), 1996: Integrated Approaches to Desertification Mapping and Monitoring in the Mediterranean Basin. Final Report of the Demon-1 Project; European Commission for Science, Research and Development.
- HILL, J., 1994: Spectral properties of soils and the use of optical remote sensing systems for soil erosion mapping. – IN: Bidoglio, G., Stumm, W., (Hrsg.): Chemistry of aquatic systems. Eurocourses: Chemical and Environmental Science, Bd 5, 497-526.
- HOFFER, R.M., 1978: Biological and physical considerations in applying technics to remote sensor data. – IN: SWAIN, P.H., DAVIS, S.M., 1978: Remote Sensing – the quantitative Approach. New York.
- HOFFMANN, K., 1992: Methodische Untersuchungen zur digitalen Luftbild- und Satellitenauswertung von Waldschäden in Fichtenbeständen. Dissertation an der Universität Potsdam.
- HOLBEN, B., JUSTICE, C., 1981: An examination of spectral band rationing to reduce the topographic effect of remotely sensed data. - IN: Int. J. of Remote Sensing Vol 2, No. 2, 115-133.
- HOPF, K., 1998: Die Kennzeichnung der kleinräumigen Bodenheterogenitäten großer Felder als Ground-truth-Information für die Interpretation von Fernerkundungsdaten. Diplomarbeit an der Landwirtschaftlichen Fakultät, Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Martin-Luther-Universität, Halle.
- HUNT, G. R., SALISBURY, J. W., 1973: Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks. - IN: Modern Geology 4, 85-106.
- HUNT, G.R., 1980: Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. – IN: SIEGAL, B.S., GILLESPIE, A.R., 1980: Remote Sensing in Geology, New York.

- JACQUEMONT, S., BARET, F., HANOCQ, J. F., 1992: Modeling spectral and bidirectional soil reflectance. – IN: Remote Sensing of Env. Vol. 41, 123-132.
- KAPPAS, M., 1994: Fernerkundung nah gebracht, 1. Auflage, Bonn.
- KASTEN, F., RASCHKE, R., 1972: Nomenklatur zur Beschreibung von Strahlungsmessungen und –rechnungen. Veröffentlichung am Fachbereich Extraterrestr. Physik, Abt. Physik u. Astronomie, Ruhr Universität Bochum, 31 S., Bochum.
- KEIL, M., SCHARDT, M., SCHUREK, A., WINTER, R., 1990: Forest Mapping Using Satellite Imagery. The Regensburg Map Sheet 1:200.000 as Example. IN: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 45, 33-46, Amsterdam.
- KENNEWEG, H., 1989: Einbeziehung der Fernerkundung in operationelle Inventur- und Überwachungsaufgaben der Land- und Forstwirtschaft. - IN: WINTER, R. (Hrsg.) 1989, 89-96, Oberpfaffenhofen.
- KENNEWEG, H., 1992: Use of GIS in landscape planning. - IN: Application of remote sensing and geographic Information Systems in Environmental and Natural Resources Management and Monitoring – Report of a Training Course 1992, BAYER, I., RUNKEL, M. (Hrsg.), 265-280, Feldafing.
- KENNEWEG, H., FÖRSTER, B., RUNKEL, M., 1991: Diagnose und Erfassung von Waldschäden auf der Basis von Spektralsignaturen, Abschlußbericht (Teil B6) des BMFT-Verbundprojektes „Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung“, Berlin.
- KENNEWEG, H., SCHARDT, M., SAGISCHEWSKI, H., 1996: Beobachtungen von Waldschäden im Gesamtharz mit Methoden der Fernerkundung. Institut für Landschaftsentwicklung an der Tu-Berlin, Berlin.
- KIEREIN-YOUNG, K.S., KRUSE, F.A., 1989: Comparison of Landsat Thematic Mapper images and geophysical an environmental reassert imaging spectrometer data for alteration mapping. – IN: Proceedings of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 349-359, Calgary.
- KIRCHHOF, W., MAUSER, W., STIBIG, H., 1985: Untersuchung des Informationsgehaltes von Landsat-Thematic-Mapper und SPOT-Multiband-Bilddaten mit simulierten multispektralen Bilddaten des Gebietes Freiburg. DFVLR-FB 85-49, Oberpfaffenhofen.
- KNOOP, F., LAMP, J., SCHNUG E., 1985: Regionale Variabilität von Merkmalen der Bodenfruchtbarkeit. - IN: Mitt. Deutscher Bodenkundl. Ges. 43 II, 655-660.
- KOROLYUK, T.V., SHCHERBENKO H.V., 1994: Compiling soil maps on the basis of remotely sensed data digital processing: soil interpretation. - IN: Int. J. of Remote Sensing, Vol. 17, No. 7, 1379-1400.
- KRAMER, H. J., 1996: Observation of the Earth and its Environment - Survey of Missions and Sensors, Heidelberg.
- KRESSE, S., 1996: Methodik der Erstellung von digitalen Karten der Bodennutzungseignung für ausgewählte Schläge in Thüringen auf Grundlage der Reichsbodenschätzung und der Mittelmaßstäbigen Standortkartierung für die Landwirtschaft (MMK), Dipl. Arb. an der Humboldt Universität Berlin.

- KRISHNAN, P.O., ALEXANDER, J.D., BUTTER, B.S., HUMMEL, J.W., 1980: Reflectance techniques for predicting soil organic matter. – IN: Soil Science Soc. of Am. J. 44, 1282-1285.
- KRISTOF, S.J., ZACHARY, A.L., 1974: Mapping soil features from multispectral scanner data. – IN: Photogr. Eng. Vol. 40, 1427-1434.
- KRONBERG, P., 1985: Fernerkundung der Erde - Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie, Stuttgart.
- KTBL AG 1994: Globales Positionierungssystem: Einsatz des Globalen Positionierungssystems in der Landwirtschaft - Nutzungsmöglichkeiten und Anforderungen. Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft. Arbeitspapier 175.
- KUCERA, K.P., 1984: Accuracy of Landsat imagery and air photo interpretation in predicting soils and land suitability for irrigation: an analysis of practical surveys for development in three contrasting environments. - IN: Soil Survey and Land Evaluation 4 (1), 8-17.
- KUDRAT, M., TIWARI, A. K., SAHA, S. K., BHAN, S. K., 1992: Soil resource mapping using IRS 1A-LISS II digital data - A case study of Kandi area adjacent to Chandigarh-India. - IN: Int. J. of Remote Sensing Vol. 13, No. 17, 3287-3302.
- KÜHBAUCH, W., DOCKTER, K., 1997: Nutzen flächenorientierter Geodaten in der Landwirtschaft – von der Betriebsplanung bis zur Agrarstatistik. - IN: GIS 3/97, 5-9.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G., SCHWERTDFEGER, G., 1994: Bodenkunde, 4. Auflage, Stuttgart.
- LAMP, F., SCHNUG, E., 1987: Rechnergestützte Düngung mit Hilfe digitaler Hofkarten. Schriftenreihe Agrarwissenschaftliche Fakultät Kiel, H. 69, 61-70.
- LAMP, J., GOTTFRIED, K., 1994: Effiziente Erstellung digitaler Hofbodenkarten als Grundlage der rechnergestützten Pflanzenproduktion. – IN: KTBL AG 1994: Globales Positionierungssystem: Einsatz des Globalen Positionierungssystems in der Landwirtschaft - Nutzungsmöglichkeiten und Anforderungen. Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft. Arbeitspapier 175.
- LEE, K.S., LEE, G.B., TYLER, E.S., 1988: Thematic Mapper and digital elevation modeling of soil characteristics in hilly terrain. – IN: Soil Science Soc. of Am. J. Vol. 52, 1104-1107.
- LEONE, A.P., WRIGHT, G.G., CORVES, C., 1995: The application of satellite remote sensing in upland areas of Southern Italy. - IN: Int. J. of Remote Sensing Vol 16, No. 6, 1087-1105.
- LIEBEROTH, I., 1982: Bodenkunde, 3. Auflage, Berlin.
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W., 1987: Remote Sensing and Image Interpretation. 2. Aufl., New York.
- LIST, F.K. und MEIBNER, B., (HRSG.) 1983: Fernerkundung der Erde an der FU Berlin. - Berliner geowiss. Abh., A 47, Berlin.

- MAGDEBURG, C., 1999: Möglichkeiten visueller Interpretation von Satellitendaten zur Untersuchung von Bodenerosion in Thüringen, Diplomarbeit im Studiengang Landschaftsplanung an der TU-Berlin, Institut für Landschaftsentwicklung, Berlin
- MATHEWS, H.R., CUNNINGHAM, R.L., PETERSON, G.W., 1973: Application of multispectral remote sensing to soil survey research in southeastern Pennsylvania. – IN: Soil Science Soc. of Am. J. 37, 88-93.
- MC KEAGUE, J.A., DAY, J.H., SHIELDS, J.A. 1971: Evaluating relationships among soil properties by computer analysis, Canadian Journal of Soil Science No 51, 105-111.
- MINNUS, E., 1967: Spektrale Remission unbewachsener Böden als Faktor bei der Luftbildinterpretation. IN: Schriftenr. Geogr. Luftbildinformation, Heft 2, Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, Bonn.
- MONTGOMERY, O.L., BAUMGARDNER, M.F., WEISMILLER 1976: An investigation of the relationship between spectral reflectance and chemical, physical and genetic characteristics of soils – IN: LARS Techn Rep. 082776 Purdue University Indiana.
- MULDERS, M.A., 1987: Remote Sensing in Soil Science, Amsterdam, Oxford, New York.
- MÜLLER, R., 1987: Untersuchungen zum Einfluß des Beobachtungswinkels und der Atmosphäre auf die Klassifizierung von Waldschäden, IN: DFVLR Tagungsband, 2. DFVLR-Statusseminar – Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung, Oberpfaffenhofen/München 1988.
- MUNSELL SOIL COLOR COMPANY 1950: Munsell soil color charts, Baltimore.
- MYERS, V. I., 1975: Crops and soils. – IN: REEVES, R. (Hrsg.): Manual of remote sensing, Vol. 2, Falls Church.
- OBUCHOV, A. I., ORLOV, D. S., 1964: Spectral reflectivity of the major soil groups and possibility of using diffuse reflection in soil investigations. - IN: Pochvovednie, 2.
- ORLOV D. S., 1966: Quantitative patterns of light reflection soils; influence of particle size on reflectivity; - Doklady soil science, Suppl. 13.
- PAGE, N. R. 1974 : Estimation of organic matter in Atlantic Coastal Plain soils with a color difference meter (Agron. J. 66: 652-653.
- PCI 1996: PCI - Using PCI Software Vol.1 1996.
- PLANET 1969/70: Some comments on the Reflectance Measurements of wet soils. - IN: Rem. Sens. of Env. Vol. 1, 127-129.
- PRICE, J.C., 1990: On the information content of soil reflectance spectra. - IN: Rem. Sens. of Env. Vol. 33, 113-121.
- PRIETSCH 1998 (mündl.): ZALF Müncheberg.
- RAMASAMY, S.M., VENKATASUBRAMANIAN, V., ANBAZHAGAN, S., 1993: Reflectance spectra of minerals and their discrimination using Thematic Mapper, IRS and SPOT multi-spectral data. - IN: Int. J. of Remote Sensing Vol. 14; No. 10, 2935-2970.

- RAU, D., SCHRAMM, H., WUNDERLICH, J., 1995: Leitbodenformen Thüringens. - IN: Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, Thüringer Landesanstalt für Geologie, Weimar, Beiheft 3, 5-102.
- REES W.G., 1990: Physical Principals of Remote Sensing, Cambrige.
- REICHE, E.W., SCHLEUB, U., 1992: Untersuchungen zur Aussagegenauigkeit von Daten der Reichsbodenschätzung anhand der Ergebnisse einer aktuell durchgeführten Bodenkartierung mit Hilfe eines Geografischen Informationssystems (GIS). - IN: Mitt. Deutscher Bodenkundl. Ges., Bd. 67, 249-252.
- RICHARDS, J. A., 1993: Remote Sensing Digital Image Analysis, Berlin/Heidelberg.
- RICHTER, H. [U.A. 1970: Periglazial- Löß- Paläolithikum im Jungpleistozän der Deutschen Demokratischen Republik, 1. Auflage, Gotha/Leipzig.
- RICHTER, R., 1992: Radiometrische Auslegung von Sensoren und quantitative Auswertung von Fernerkundungsdaten im optischen Spektralbereich. - IN: DLR Forschungsbericht, Oberpfaffenhofen.
- SABINS, F.F., 1987: Remote Sensing - principles and interpretation, San Francisco.
- SADORNIKOV, YU. N., ORLOV, D. S. 1978: Spectrophotometry to characterize soils, soil colouration and quantitativ laws of reflection of light by soils. – IN: Agrochemistry, 4, 133-151.
- SCHANDA, E., 1986: Physical Fundamentals of Remote Sensing, Berlin/Heidelberg.
- SCHARDT, M., 1987: Expositionsabhängiges Reflexionsverhalten von Waldbeständen im Schwarzwald. - IN: DFVLR Tagungsband, 2. DFVLR-Statusseminar – Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung, Oberpfaffenhofen/München 1988.
- SCHARDT, M., 1990: Verwendbarkeit von Thematic Mapper Daten zur Klassifizierung von Baumarten und natürlichen Altersklassen. DLR-Forschungsbericht (DLR-FB 90-44), Oberpfaffenhofen.
- SCHEFFER, F., [u.a.] 1992: Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage, Stuttgart.
- SCHEFFIELD, C., 1985: Selecting band combinations from multispectral data. - IN: Photogr. Eng. and Remote Sensing Vol. 51, No. 6, 681-687.
- SCHMIDT, R., DIEMANN, R., 1974: Richtlinie für die Mittelmaßstäbige Standortkartierung (MMK), Eberswalde-Finow.
- SCHMIDT, R., DIEMANN, R., 1981: Erläuterungen zur Mittelmaßstäbigen Standortkartierung (MMK), Müncheberg.
- SCHNUG, E., HOLST, P., 1994: CAF – Realisierung einer ökologischen und ökonomischen Landwirtschaft. – IN: KTBL AG 1994: Globales Positionierungssystem: Einsatz des Globalen Positionierungssystems in der Landwirtschaft - Nutzungsmöglichkeiten und Anforderungen. Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft. Arbeitspapier 175.
- SCHOWENGERDT, R.A. 1983: Techniques for image processing and classification in remote sensing, New York.
- SCHRAMM, H.A., 1995: Böden. – IN: SEIDEL, G. (HRSG.), 1995: Geologie von Thüringen, Stuttgart.

- SCHRÖDER, H., 1984: Musterausprägung und spektrales Abbildungsverhalten von Lößböden im Mittelsächsischen Hügelland. - IN: Geografische Berichte 112, Heft 3, 185-196.
- SCHRÖDER, H., 1986: Multispektrale Luftbildanalyse zur Ausgliederung von bodenerosiv geschädigten Standorten. - IN: Petermanns Geogr. Mitt., 130, 129-133.
- SCHRÖDER, H., 1988: Multispektralanalytische Quantifizierung bodenbedingter Standortmerkmale des östlichen Harzvorlandes. - IN: Hercynia 25, 129-141.
- SCHRÖDER, H., 1989: Fernerkundung von Löß- und Verwitterungsstandorten und deren bodenerosiver Schädigung unter Anwendung von Verfahren der Multispektralanalyse. - IN: Petermanns Geografischer Mitteilungen 133/2, 129-139.
- SCHRÖDER, H., 1992: Bodenerosive Landschaftsschäden in Fernerkundungsaufzeichnungen. - IN: Bonner Geogr. Abh., Heft 85, 55-67.
- SCHWERTMANN, U., 1988: Occurance and information of iron oxides in various pedoenvironments. - IN: STUCKI, S.W., GOODMAN, B.A., SCHWERTMANN, U. (Hrsg.): Iron in Soils and clay minerals, 267-308. NATO ASI series Reidel Publ. Comp. Dordrecht, Boston, Tokyo.
- SEIDEL, G., 1995: Geologie von Thüringen, Stuttgart.
- SEYFERT, A., 1996: Nutzung der Bodenschätzung zum Aufbau eines Boden-informationssystems in Thüringen. Hrsg.: Thür. Landesanstalt für Geologie, Weimar.
- SHORT, N.M., 1982: The Landsat Tutorial Workbook. Basics of Sattelite Remote Sensing - NASA References Publ. 1078.
- SIEGAL, B.S., GILLESPIE, A.R., 1980: Remote Sensing in Geology, New York.
- STONER, E.R., BAUMGARDNER, M.F. BIEHL, L.L., ROBINSON, B.F., 1980: Atlas of soil reflectance Properties. - Research Bulletin 962, Purdue University.
- STONER, E.R., BAUMGARDNER, M.F., 1981: Characteristic variations in reflectance of surface soils. - IN.: Soil Science Soc. of Am. J. Vol. 45, 1161-1165.
- SU HAIPING, RANSOM M.D., KANEMASU, E.T., 1989: Detecting Soil Information on a Native Prairie using Landsat TM and Spot Satellite Data. - IN: Soil Science Soc. of Am. J. Vol. 53, 1479-1483.
- SWAIN, P. H., DAVIS, S. M., 1978: Remote Sensing – the quantitative approach, New York.
- TAN, H., 1988: Vergleich der Aussagekraft von SAR- und anderen Fernerkundungsdaten für die Landnutzung und Geologie in humiden und ariden Gebieten, Berl. Geow. Abh., Berlin.
- THOMPSON, D.R., HENDERSON, K. E. 1984: Evaluation of Thematic Mapper for detecting soil properties under grassland vegetation. - IN: IEEE - Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol. GE-22, No 3, 319-323.

- THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (TLL), JENA 1997: Materialsammlung zu den Bodendauerbeobachtungsflächen Großobringen 1 und 2, Unveröffentlicht, Jena.
- THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND DAIMLER-BENZ AEROSPACE JENA-OPTRONIK GMBH (DJO) 1996: Nutzung Hochauflösender Satellitendaten für Aufgaben der Landwirtschaftsverwaltung Thüringens. Abschlußbericht HOLT 2.
- THÜR. LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, JENA 1998: Lysimeterstationsaufzeichnungen, Buttelstedt.
- VAN DER MEER, F., VAN DIJK P.M., WESTERHOF, A.B., 1995: Digital classification of the contact metamorphic aureole along the Los Pedroches batholith, south-central Spain, using Landsat Thematic Mapper. - IN: Int. J. of Remote Sensing Vol. 16, No. 6, 1043-1062.
- VILLWOCK, G., 1983: Untersuchungen zur Ermittlung von Merkmalen der standörtlichen Heterogenität landwirtschaftlicher Nutzflächen mit Methoden der Geofernerkundung, Dissertation, Martin Luther Universität Halle.
- VINCENT, K.R., 1997: Fundamentals of geological and environmental remote sensing, London.
- VOLK, P., 1992: Case studies on applied remote sensing for landuse and geological mapping in subtropical regions. IN: Application of remote sensing and geographic Information Systems in Environmental and Natural Resources Management and Monitoring – Report of a Training Course 1992, BAYER, I., RUNKEL, M. (Hrsg.), 220-230, Feldafing.
- WARTENBERG, G., 1995: GPS - Ein Baustein des Pflanzenschutzes. - IN: DLG Mitteilungen, Heft 1, 36-39.
- WERNER, D. 1998 (mündl.): TLL Jena.
- WEVER, T., 1989: Versuch eines Rückschlusses aus der Vegetation auf den geologischen Untergrund im Raum Amberg mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung nach TM Daten, DFVLR Forschungsbericht FB 89-24, Oberpfaffenhofen.
- WILCOX, C.H., FRAZIER, B.E., BALL, S.T., 1994: Relationship between soil organic carbon and Landsat TM. - IN: Photogr. Eng. and Remote Sensing Vol. 60, No. 6, 777-781.
- WINTER, R., MARKWITZ, W., 1989: „Tagungsband 5. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums der DFVLR“, Mitteilungen der DFVLR, 125 S., Oberpfaffenhofen.
- ZADEH, L., 1965: Fuzzy sets. - IN: Information and Control 8, 338-353.
- ZÖLITZ-MÖLLER, R., HEINRICH, U., NACHBAR, M., 1997: Environmental Planning with help of digital geographical information and the Ecosystem approach. – IN: GIS 6/97, 20-24.
- [http://: www.Kodak.de/US/en/government/ias/heritage/ikonos1.shtml](http://www.Kodak.de/US/en/government/ias/heritage/ikonos1.shtml)
- [http://: www.digitalglobe.com](http://www.digitalglobe.com)

Anhang A



Abb. A-1: Untersuchungsraum bei Buttstedt als Landsat TM3 Szene (22.09.1997) mit markierten Testschlägen (eigene Bearbeitung, ohne Maßstab).

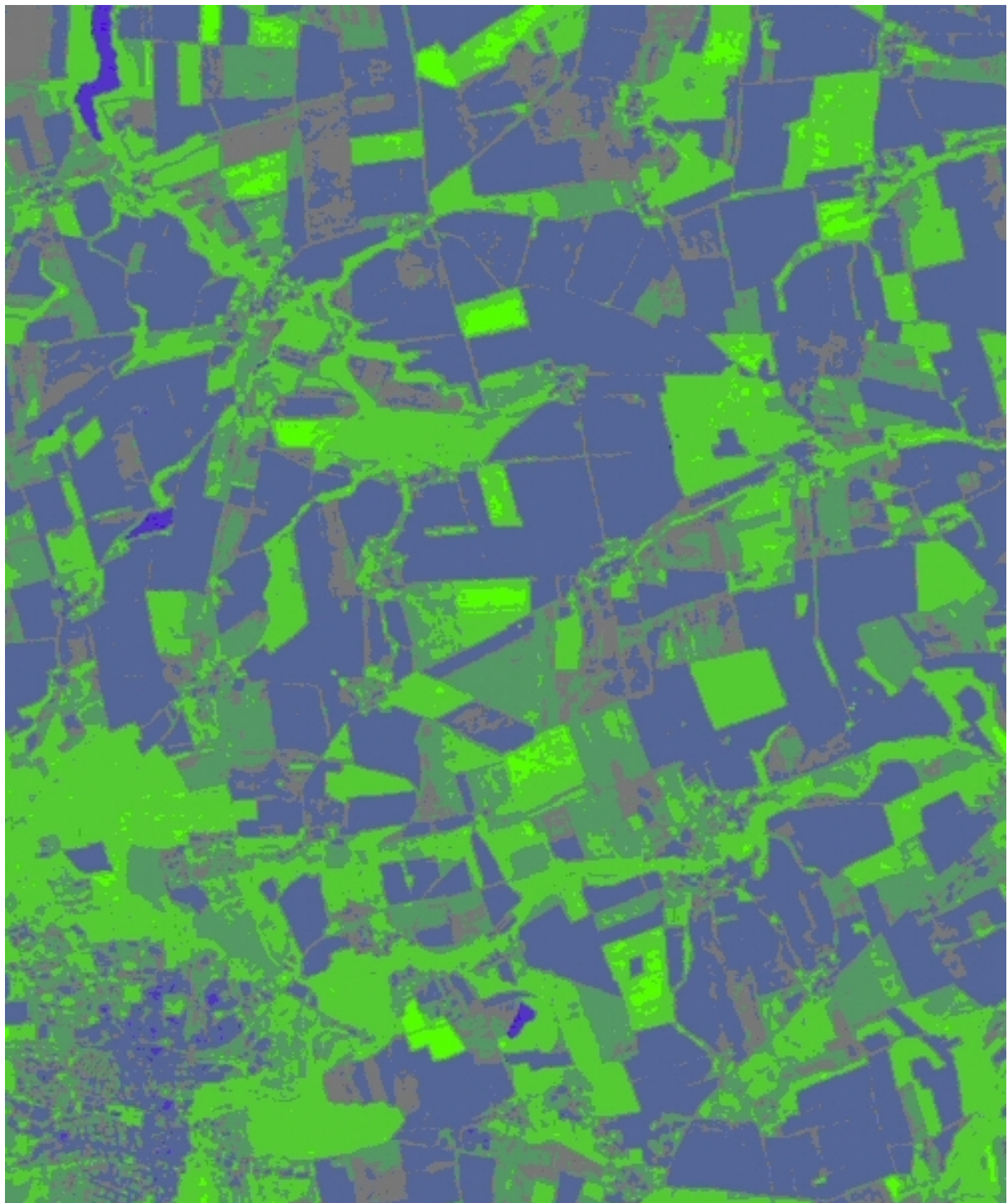


Abb. A-2: Vegetationsindex aus TM-3 und TM-4 (22.09.1997) von dem Untersuchungsraum (eigene Bearbeitung, ohne Maßstab).

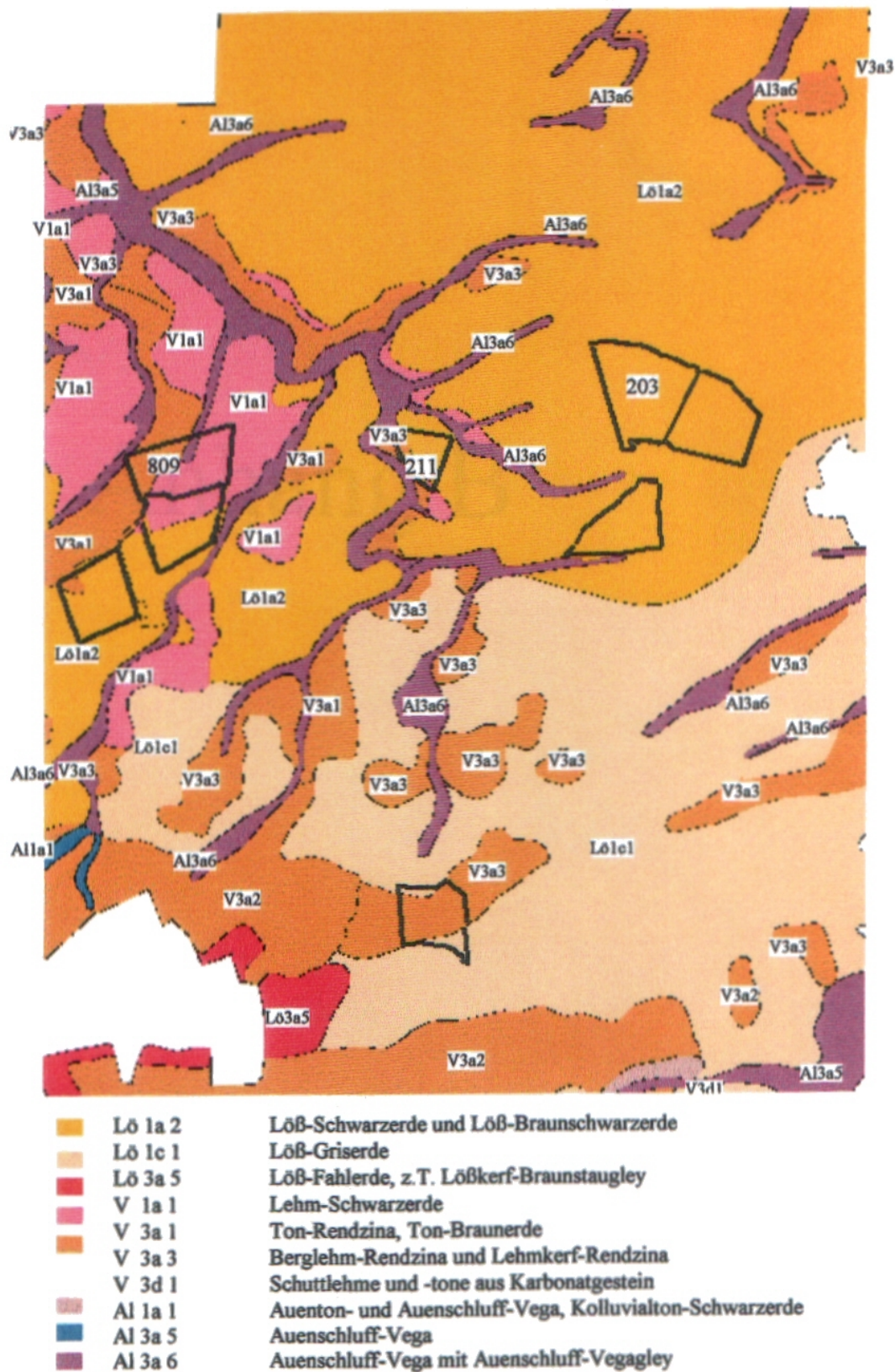


Abb. A-4: Standort-Regionaltypen der MMK (ohne Maßstab).

Anhang B

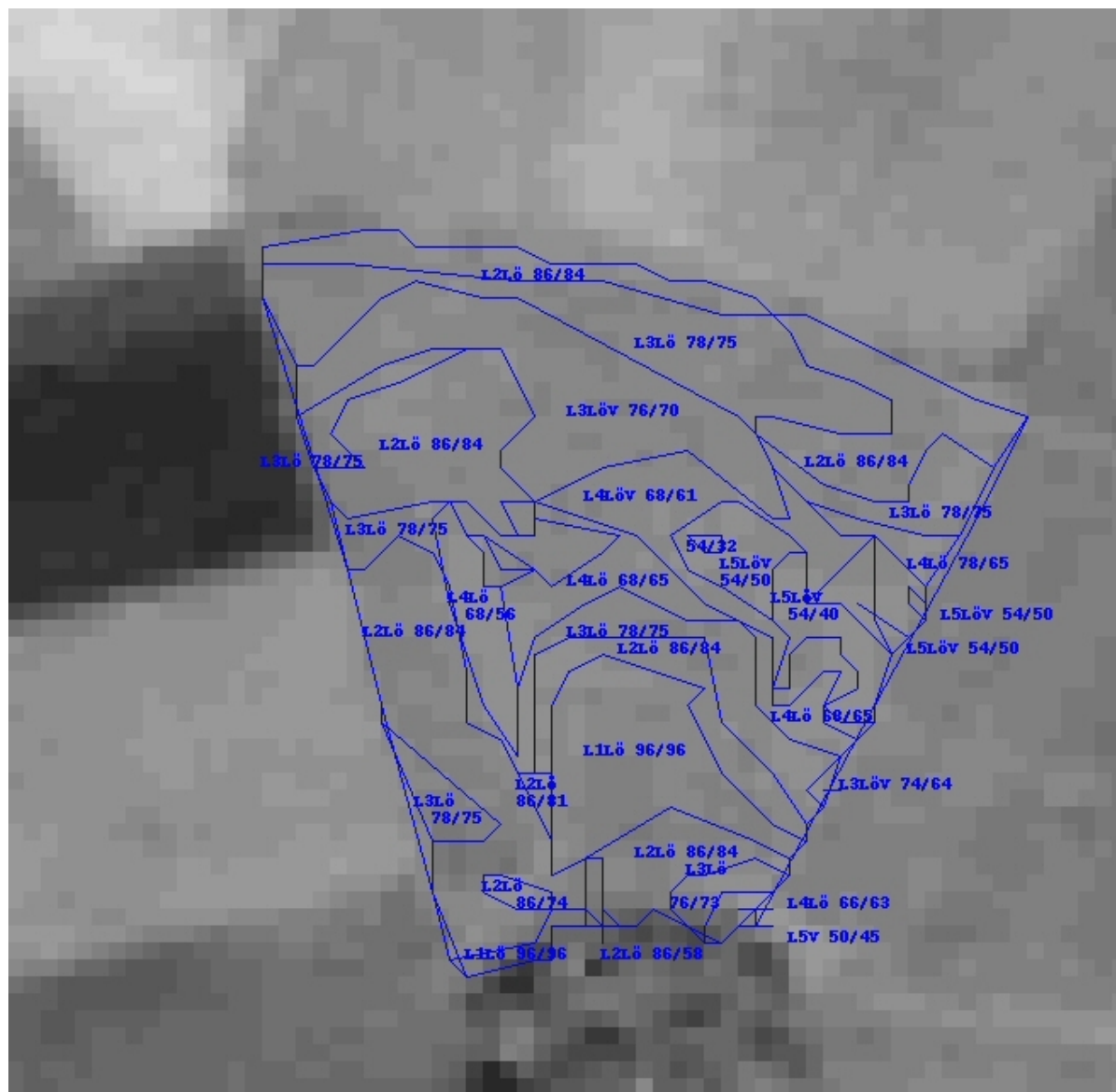


Abb. B-3: Schlag 203 in TM-5 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97 (eigene Bearbeitung, ohne Maßstab).

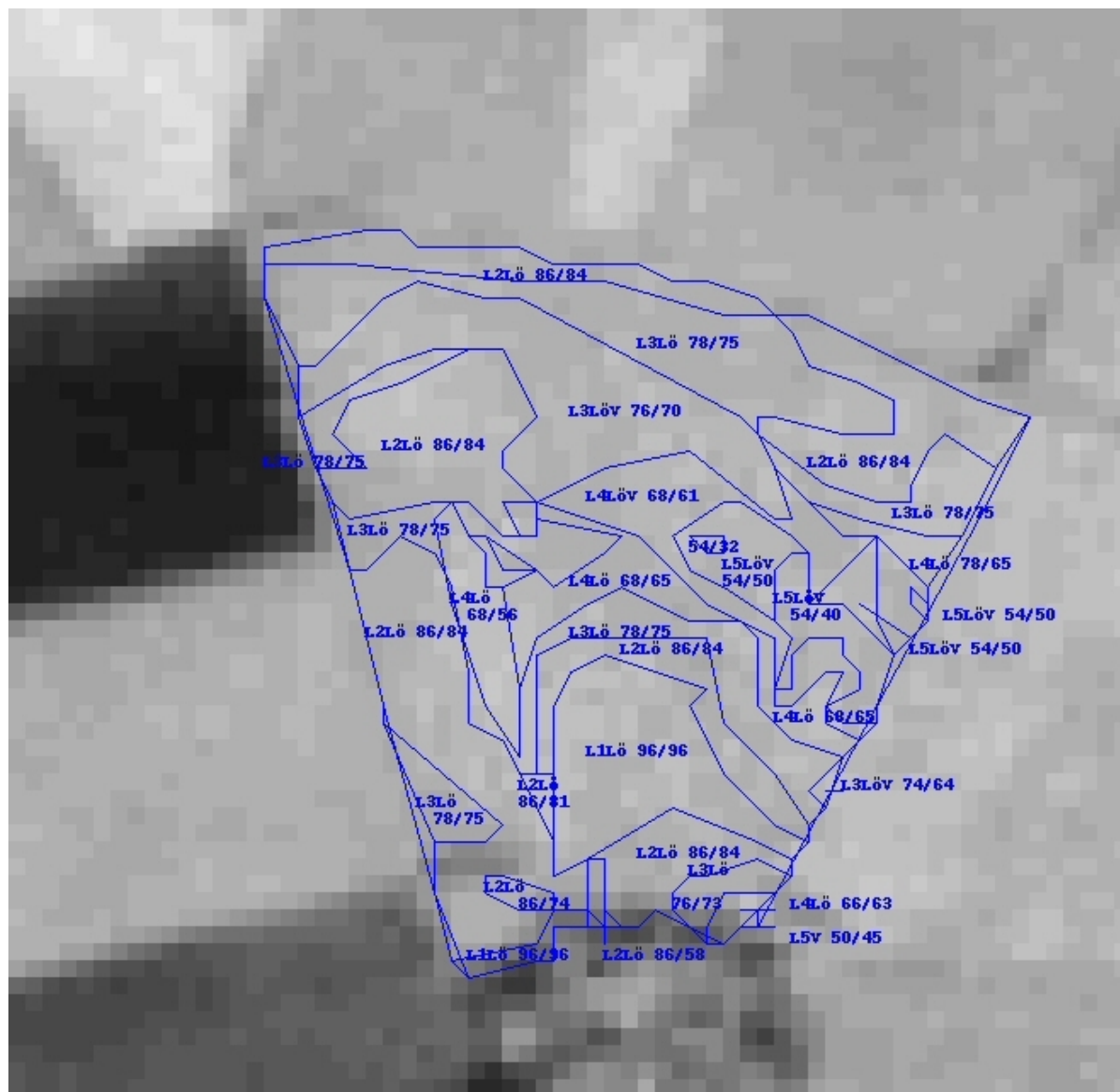


Abb. B-4: Schlag 203 in TM-7 linearisiert mit RBS überlagert –Aufnahmedatum 22.09.97 (eigene Bearbeitung, ohne Maßstab).

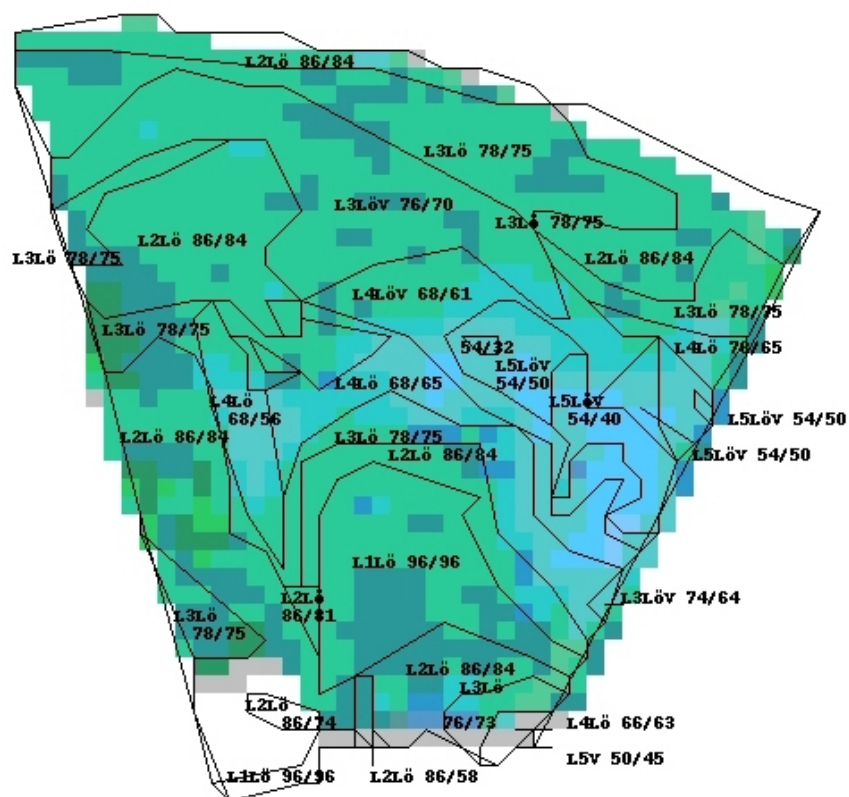


Abb. B-8: RGB TM-543 von Schlag 203 mit RBS überlagert – Aufnahmedatum 22.09.97 (eigene Bearbeitung, ohne Maßstab).